

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
JOSÉ FERNANDO PEREIRA

**COMPORTAMENTO DO FOGO EM FUNÇÃO DA FMA⁺ EM QUEIMAS
PRESCRITAS SOB POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. NO
MUNICÍPIO DE IRATI – PR**

CURITIBA
2015

JOSÉ FERNANDO PEREIRA

**COMPORTAMENTO DO FOGO EM FUNÇÃO DA FMA⁺ EM QUEIMAS
PRESCRITAS SOB POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. NO
MUNICÍPIO DE IRATI – PR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista
Co-orientadores:

Prof. PhD. Ronaldo Viana Soares
Prof. Dr. Marcos Vinicius Giongo Alves

CURITIBA
2015

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR
Ficha catalográfica elaborada por Marilene do Rocio Veiga – CRB 424/PR

Pereira, José Fernando

Comportamento do fogo em função da FMA+ em queimas prescritas sob povoamentos de *Pinus taeda* no município de Irati - PR / José Fernando Pereira. – 2015.

165 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientador: Prof. PhD. Ronaldo Viana Soares

Prof. Dr. Marcos Vinicius Giongo Alves

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/04/2015.

Área de concentração: Conservação da Natureza

1. Fogo e ecologia. 2. Incêndios florestais - Prevenção e Controle. 3. Incêndios florestais - Prevenção e controle - Irati(PR). 4. *Pinus taeda* - Irati(PR). 5. Teses. I. Batista, Antonio Carlos. II. Soares, Ronaldo Viana. III. Alves, Marcos Vinicius Giongo. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9618

CDU – 634.0.43



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da
Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER
Defesa nº. 1118

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) doutorando(a) *José Fernando Pereira* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**COMPORTAMENTO DO FOGO EM FUNÇÃO DA FMA+ EM QUEIMAS PRESCRITAS SOB POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* NO MUNICÍPIO DE IRATI - PR**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**.

Dr. Alexandre França Tetto
Universidade Federal do Paraná
Primeiro examinador

Dr. Emendes Aparecido Saraiva
CAPES-UFPR
Segundo examinador

Dr. Celso Darci Seger
Universidade Federal do Paraná
Terceiro examinador



Dr. Ronaldo Viana Soares
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador

Dr. Antonio Carlos Batista
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 24 de abril de 2015.

Antonio Carlos Batista

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

A Deus
Aos meus pais Marcos e Marta
Minha família e amigos
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo reestabelecimento de minha saúde permitindo assim que concluísse esse trabalho e por guiar-me em seus caminhos.

A todos os médicos e funcionários do hospital Erasto Gaertner.

A minha família, em especial aos meus pais, pelos seus esforços aplicados na formação dos filhos e principalmente pelo apoio nos momentos mais difíceis.

A todos os professores que tive, por seus intensos esforços no processo de desenvolvimento de meus conhecimentos.

À memória de meus antepassados.

Ao Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEPCS), onde obtive apoio irrestrito para o desenvolvimento dos trabalhos de campo, em especial a todos os seus professores e funcionários.

Aos Técnicos Florestais Efraim da Luz, Gilcinei Antonio dos Santos e Matheus Halbach, que compuseram minha equipe de campo e foram fundamentais para o desenvolvimento das atividades de coleta de dados.

À UFPR, onde obtive meus títulos de Engenheiro Florestal e Mestre em Ciências Florestais, ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, em especial a Reinaldo Mendes de Souza e David Teixeira de Araújo pelo grande apoio e amizade.

Aos profissionais com quem atuei no mercado de trabalho, que contribuíram no aprimoramento de minha conduta profissional, em especial ao Engenheiro Florestal Renato Olivir Basso, por tornar possível meu ingresso na Universidade.

Ao Professor Antonio Carlos Batista, orientador e amigo, responsável por estabelecer diretrizes fundamentais para a elaboração desse trabalho.

Ao professor Co-orientador Ronaldo Viana Soares e aos professores Jorge Luiz Monteiro de Matos, Nilton José Sousa, Alexandre França Tetto e à Professora Daniela Biondi, por sua colaboração e amizade.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Combustão: Liberação da energia química presente na matéria orgânica.....	08
FIGURA 2	- Interação entre os triângulos que definem a ocorrência, propagação e intensidade do fogo em áreas florestais.....	09
FIGURA 3	- Representação esquemática da medição do comprimento de chamas e equação para o cálculo da intensidade do fogo.....	13
FIGURA 4	- Localização geográfica do município de Irati –PR.....	31
FIGURA 5	- Mapa de uso do solo do CFEEPCS em Irati - PR, com indicação dos talhões amostrados e localização da estação meteorológica convencional do INMET.....	32
FIGURA 6	- Vista da área 01 <i>Pinus taeda</i> com 5 anos de idade.....	33
FIGURA 7	- Vista da área 02 <i>Pinus taeda</i> com 8 anos de idade.....	34
FIGURA 8	- Vista da área 03 <i>Pinus taeda</i> com 11 anos de idade.....	34
FIGURA 9	- Classificação climática segundo Köppen do estado do Paraná e localização do município de Irati – PR.....	35
FIGURA 10	- Representação esquemática do experimento instalado nos talhões 23, 35 e 39 do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEEPCS) em Irati – PR.....	40
FIGURA 11	- Representação esquemática de localização das amostras de material combustível em uma parcela.....	41
FIGURA 12	- Esquema de caracterização das camadas coletadas que formam a manta de material combustível.....	43
FIGURA 13	- Esquema de caracterização da queima das parcelas.....	45
FIGURA 14	- Equipamentos utilizados durante as coletas de campo.....	47
FIGURA 15	- Comportamento da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA ⁺) no período de 2008 a 2011 para Irati - PR.....	49
FIGURA 16	- Distribuição dos graus de perigo FMA ⁺ para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para Irati PR.....	50
FIGURA 17	- Distribuição dos graus de perigo FMA ⁺ por estação do ano para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para a região de Irati – PR.....	50
FIGURA 18	- Comportamento da FMA ⁺ para os meses de julho a setembro de 2012 indicando o período de coleta de dados	51
FIGURA 19	- Aspectos do comportamento do fogo em função dos graus de perigo da FMA ⁺	53
FIGURA 20	- Precipitação pluviométrica anual para a região de Irati – PR.	55
FIGURA 21	- Precipitação pluviométrica acumulada mensal para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para Irati – PR (em evidência o período com maiores registros de incêndios para o estado do Paraná).....	55

FIGURA 22	- Precipitação pluviométrica anual por estação do ano para os anos de 2008 a 2012 para Irati – PR.....	56
FIGURA 23	- Precipitação acumulada para os meses de junho, julho, e agosto nos anos de 2008, 2009, 2010, 2011 e 2012 e os índices históricos para o período correspondente para a região de Irati – PR.....	57
FIGURA 24	- Precipitação para o período outono – inverno do ano de 2012 para a região de Irati – PR.....	58
FIGURA 25	- Precipitação diária para o período de coleta em Irati – PR....	58
FIGURA 26	- Temperatura média mensal para de Irati – PR no período de 2008 a 2011 e médias mensais do ano de 2012.....	59
FIGURA 27	- Temperaturas diárias (dados de campo) e temperatura das 15:00 horas da estação meteorológica do INMET para Irati –PR.....	60
FIGURA 28	- Médias mensais da velocidade do vento para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 em Irati – PR.....	61
FIGURA 29	- Velocidade do vento nos dias de coleta de dados (médias de campo) e dados de velocidade do vento das 15:00 horas do INMET para a Irati – PR.....	62
FIGURA 30	- Comparação da umidade relativa do nos dias de coleta, da estação às 15:00 horas e estimada às 13:00 horas em Irati – PR.....	63
FIGURA 31	- Variação da espessura da manta de material combustível em função da idade.....	64
FIGURA 32	- Quantidade de material combustível (kg.m^{-2}) em função da idade, por grau de decomposição e classe diamétrica.....	65
FIGURA 33	- Ajuste de Funções logarítmicas para a carga de material combustível fino para as diferentes idades.....	66
FIGURA 34	- Variação da espessura da manta de material combustível em função da queima das parcelas nos diferentes graus de perigo de incêndios FMA^+	67
FIGURA 35	- Material combustível consumido pelo fogo das classes (Ln1 , Ln2 e Lv) em função dos graus de perigo de incêndios FMA^+	68
FIGURA 36	- Material combustível consumido pelo fogo da classe (LB) em função dos graus de perigo de incêndios FMA^+	69
FIGURA 37	- Ajuste de funções logarítmicas para a quantidade de material combustível consumida pelo fogo em função dos graus de perigo de incêndios FMA^+	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	-	Classificação da velocidade de propagação do fogo	11
TABELA 2	-	Velocidades médias de propagação do fogo (R) intensidade (I) e calor liberado (Ha).....	12
TABELA 3	-	Correlação entre intensidade do fogo (I) e altura de carbonização da casca das árvores (H_{cb}) de <i>Pinus taeda</i> em queimas controladas contra e a favor do vento – Paraná – Brasil.....	14
TABELA 4	-	Restrições do índice de Nesterov em função da quantidade de chuva do dia.....	28
TABELA 5	-	Escala de perigo do índice de Nesterov.....	28
TABELA 6	-	Restrições da Fórmula de Monte Alegre (FMA) em função da quantidade de chuva do dia.....	29
TABELA 7	-	Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre.....	29
TABELA 8	-	Restrições da FMA ⁺ em função da quantidade de chuva do dia.....	30
TABELA 9	-	Interpretação do grau de perigo pela FMA ⁺	30
TABELA 10	-	Variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo INMET.....	36
TABELA 11	-	Variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo INMET.....	37
TABELA 12	-	Estimativa da umidade relativa do ar das 13:00 horas e cálculo do índice de perigo de incêndios FMA ⁺ para o período de 2008 a 2011.....	38
TABELA 13	-	Graus de perigo FMA ⁺ utilizados nos ajustes dos modelos matemáticos desenvolvidos.....	39
TABELA 14	-	Número de observações para análises das variáveis meteorológicas (INMET Irati - PR) para o período de 2008 a 2011 e 2012.....	48
TABELA 15	-	Médias das variáveis meteorológicas e das variáveis do comportamento do fogo observadas em função dos graus FMA ⁺	52
TABELA 16	-	Matriz de correlação dos parâmetros do comportamento do fogo em função das variáveis meteorológicas e do índice de perigo de incêndios FMA ⁺	74
TABELA 17	-	Modelos para a estimativa da velocidade de propagação do fogo com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndios FMA ⁺	76
TABELA 18	-	Modelos para a estimativa do comprimento de chamas com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndio FMA ⁺	77
TABELA 19	-	Modelos para a estimativa da intensidade do fogo com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndios FMA ⁺	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	INCÊNDIOS FLORESTAIS	3
2.2	COMPORTAMENTO DO FOGO	8
2.2.1	Taxa de propagação	11
2.2.2	Intensidade do fogo	12
2.2.3	Carbonização da casca das árvores	14
2.2.4	Modelagem do comportamento do fogo	15
2.3	METEOROLOGIA	18
2.3.1	Precipitação pluviométrica	18
2.3.2	Temperatura	20
2.3.3	Vento	21
2.3.4	Umidade relativa do ar	22
2.4	ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS	23
2.4.1	Índice de Angström (B)	26
2.4.2	Índice de Nesterov (G)	27
2.4.3	Fórmula de Monte Alegre (FMA)	29
2.4.4	Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA ⁺)	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	ÁREA DE ESTUDO	31
3.1.1	Características dos povoamentos	33
3.1.2	Clima	35
3.2	METODOLOGIA	35
3.2.1	Dados Meteorológicos	36
3.2.2	Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA ⁺)	37
3.2.3	Instalação do experimento e coletas de campo	39
3.2.4	Queima das parcelas	43
3.2.5	Atividades desenvolvidas em laboratório	45
3.2.6	Análises estatísticas	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS EM FUNÇÃO DA FMA ⁺	48
4.1.1	Precipitação pluviométrica	54
4.1.2	Temperatura	59
4.1.3	Velocidade do vento	60
4.1.4	Umidade relativa do ar	62
4.2	MATERIAL COMBUSTÍVEL	63
4.2.1	Eficiência da queima em função da FMA ⁺	66
4.3	ANÁLISES DE CORRELAÇÃO	71
4.3.1	Modelos para estimativa dos parâmetros do comportamento	75
4.3.1.1	Estimativa da velocidade de propagação	75
4.3.1.2	Estimativa do comprimento de chamas	76
4.3.1.3	Estimativa da intensidade do fogo	78
5	CONCLUSÕES	79
6	RECOMENDAÇÕES	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICES	94

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido em povoamentos de *Pinus taeda* L., com idades de 5, 8 e 11 anos, localizados nas dependências do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEEPES), localizado no município de Irati (PR). O objetivo principal foi verificar a correlação existente entre o índice de perigo de incêndios FMA^+ com os parâmetros do comportamento do fogo em queimas prescritas. Primeiramente foi feita uma avaliação do comportamento das variáveis meteorológicas para região, através dos dados meteorológicos de 2008 a 2011, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de sua estação localizada no município de Irati (PR). Posteriormente a FMA^+ foi calculada, indicando a distribuição dos graus de perigo ao longo dos anos. Esse estudo preliminar permitiu definir o melhor momento para a instalação do experimento e coleta de dados em campo. A pesquisa foi estruturada com a instalação de 150 parcelas com dimensões de 3 por 10 metros, correspondendo a 50 parcelas para cada idade e 10 parcelas para cada grau de perigo FMA^+ (nulo, pequeno, médio, alto e muito alto). Foram queimadas 30 parcelas para cada grau de perigo, correspondendo a 10 parcelas para cada idade. No índice nulo as parcelas não queimaram. Foram coletadas 6 amostras de material combustível (30 x 30 cm) em cada parcela, sendo estas, estabelecidas de forma sistemática, onde eram coletadas 3 amostras antes da queima e 3 amostras após a queima. O material combustível fino com diâmetro < 7 mm, contido nas amostras foi classificado como: Ln1 superficial; Ln2 intermediária; Lv inferior. O material com diâmetro de 0,7 a 2,5 cm foi denominado LB. A coleta de material combustível antes da queima foi efetuada entre às 10:00 e 13:00 horas e a coleta das amostras após a queima foi realizada entre às 16:00 e 17:30 horas. A queima das parcelas ocorreu entre às 13:00 e 17:00 horas. As análises de variância desenvolvidas em função das variáveis meteorológicas e dos graus de perigo de incêndios apresentaram diferenças significativas. A carga total de material combustível apresentou valores médios de 8,8; 10,1 e 15,7 ton.ha⁻¹ para as áreas de 5, 8 e 11 anos, respectivamente. A classe Ln1 apresentou pouca variação entre as áreas, com valores entre 0,21 e 0,38 kg.m⁻²; a classe Ln2 não foi encontrada na área de 5 anos e para as áreas de 8 e 11 anos os valores ficaram entre 0,22 e 0,36 kg.m⁻², respectivamente. A classe Lv apresentou maior variação entre as áreas, com valores médios de 0,40; 0,43 e 0,76 kg.m⁻² para as áreas de 5, 8 e 11 anos, respectivamente. As funções ajustadas para as classes Ln1, Ln2 e Lv obtiveram R² de 0,99; 0,93 e 0,80 para as idades de 5, 8 e 11 anos, respectivamente. O material combustível consumido pelo fogo e a espessura da manta apresentaram variação gradativa em função dos graus de perigo. Foram obtidos altos coeficientes de correlação dos parâmetros do comportamento do fogo com o índice de perigo de incêndios FMA^+ , onde se verificou que o uso da escala de perigo da FMA^+ , bem como os valores da FMA^+ obtidos com os cálculos diários, apresentaram valores muito próximos, indicando um bom ajuste do índice FMA^+ para a região. Para os graus de perigo, os coeficientes de correlação (r) obtidos com os parâmetros do comportamento do fogo indicaram uma associação de 0,75 para a intensidade; 0,64 para a velocidade de propagação; 0,72 para o comprimento de chamas e de 0,71 para a altura de carbonização da casca. Para os valores diários da FMA^+ foram obtidos (r) de 0,74 para a intensidade; 0,62 para a velocidade de propagação; 0,67 para o comprimento de chamas e de 0,70 para a altura de carbonização da casca. Os modelos desenvolvidos para a estimativa da velocidade de propagação apresentaram R² de 0,93, para o comprimento de chamas os parâmetros estatísticos das equações apresentaram R² de 0,95 e os modelos obtidos para a intensidade apresentaram R² de 0,88. Concluiu-se que a FMA^+ apresentou forte relação com as variáveis que descrevem o comportamento do fogo.

Palavras chave: Variáveis meteorológicas, material combustível, graus de perigo de incêndios, parâmetros do comportamento do fogo, povoamentos.

ABSTRACT

This research was developed in commercial stands of *Pinus taeda* 5, 8 and 11 years old planted in the dependencies of the Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEEPCS), located in Irati County, Paraná State, Brazil. The main objective of the work was to verify the existent correlation between the fire danger index FMA^+ and the fire behavior parameters in prescribed burnings. Initially, an analysis of the meteorological variables was made, using local data from 2008 to 2011, provided by the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Afterwards, the daily fire danger index FMA^+ was calculated, showing the danger degrees distribution along the years and indicating the best period to the experiment installation and data collection. The research included the installation of 150 plots measuring 3x10m each, corresponding to 50 plots for each age and 10 plots for each FMA^+ danger degree (Null, Low, Medium, High and Very High). From each plot six fuel samples (30x30 cm) were collected. These sub-plots were located in a systematic way within the plots; three samples were collected before the burn and 3 samples after the burn. Fine fuel material (diameter < 7mm), was classified as Ln1 superficial, Ln2 intermediate and Lv inferior; material with diameter > 7mm and < 25mm was named LB. Fuel material was collected between 10 a.m. and 1 p.m. and the plots were burned between 1 p.m. and 5 p.m. Residual fuel was collected between 4 and 5:30 p.m. The total fuel load presented medium values ranging from 8.8 to 10.1 and 15.7 ton.ha⁻¹ for the ages 5, 8, and 11 years old, respectively. Ln1 class showed little variation among the ages, with values between 0.21 and 0.38 kg.m⁻². Ln2 class wasn't found in the 5-year-old area and for the ages 8 and 11 years the values ranged between 0.22 and 0.36 kg.m⁻². Lv class presented higher variation among the ages, with medium values of 0.40, 0.43, and 0.76 kg.m⁻² for the ages 5, 8, and 11 years old, respectively. High correlation coefficients between the fire behavior parameters and both FMA^+ indicators, the daily value and the danger class, were observed. For the danger classes, the correlation analysis indicated coefficients of 0.75 with the fire intensity, 0.72 with the flame length, 0.64 with the rate of spread, and 0.71 with the bark char height. For the daily values the coefficients were 0.74, 0.62, 0.67, and 0.70 for the fire intensity, the rate of spread, the flame length, and the bark char height, respectively. In general, the analysis of variance comparing the meteorological variables and the fire danger degrees presented significant differences. The adjusted functions for Ln1, Ln2 and Lv showed R^2 of 0.99; 0.93 and 0.80 for the ages 5, 8, and 11 years old, respectively. The fuel material consumed by the fire and the litter depth showed a gradual variation in function of the danger degrees. The models developed to estimate the rate of spread, the flame length, and the fire intensity presented determination coefficients (R^2) of 0.93, 0.95, and 0.88, respectively.

Keywords: Meteorological variables, forest fuel, fire danger indices, fire behavior.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos de avaliação do comportamento do fogo constituem hoje uma ferramenta mais que necessária para auxiliar nas atividades de prevenção e combate aos incêndios florestais. O fogo é o fator que promove os maiores danos às florestas de todo o mundo. Dessa forma, o estudo do seu comportamento tem possibilitado entender os fatores que têm um papel importante no início, na propagação e na dificuldade de se extinguir os incêndios.

No Brasil, os incêndios florestais suscitam relevantes impactos e constituem um problema que sempre atrai muita atenção e promove críticas internacionais frequentes. No entanto, a comunidade civil e científica é consciente da gravidade destes problemas, reconhecendo a importância do desenvolvimento de ações efetivas nas áreas de pesquisa, educação, prevenção e combate aos incêndios florestais.

No sul do Brasil os cultivos com espécies do gênero *Pinus* constituem relevante importância econômica. Esses cultivos apresentam naturalmente condições mais favoráveis para a ignição e propagação do fogo, onde prejuízos causados pelos incêndios envolvem a morte ou redução da capacidade produtiva dos cultivos, impactos nos rios, solos e, ainda emissões de gases nocivos ao ambiente.

Nesse sentido, verifica-se a necessidade e a urgência de se conhecer e avaliar os parâmetros do comportamento do fogo em povoamentos de *Pinus* spp, contribuindo para o estabelecimento de diretrizes para o planejamento e manejo do fogo nessas áreas.

Atualmente a gestão de incêndios florestais no Brasil, além de um foco singular na supressão, tem procurado avaliar os processos que causam efeitos diretos e indiretos do fogo e, conseqüentemente, mudanças na paisagem. Dessa forma, é primordial tratar a questão de maneira sistêmica, integrando informações. A aplicação do índice de perigo de incêndios FMA⁺ na estimativa dos parâmetros do comportamento do fogo pode produzir informações científicas que auxiliem no equacionamento e gerenciamento dos problemas relacionados aos incêndios florestais, como também no manejo do material combustível.

1.1 OBJETIVOS

- a) avaliar os parâmetros do comportamento do fogo em queimas experimentais em função da idade e da FMA^+ ;
- b) analisar a correlação entre a FMA^+ e os parâmetros do comportamento do fogo;
- c) desenvolver modelos de regressão para estimativa do comportamento do fogo em função da FMA^+ ; e
- d) verificar a relação entre o comportamento do fogo e o índice de perigo de incêndios FMA^+ em queimas prescritas em povoamentos comerciais de *Pinus taeda* ;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INCÊNDIOS FLORESTAIS

A percepção do fogo como um fator ecológico e natural tem sido muitas vezes comprometida por condutas austeras, que geralmente estão vinculadas a questões culturais e que demonstram dificuldades para legitimar o fogo como um fenômeno substancial sobre vários aspectos. Nesse contexto Carvalho (2005) sugere que deve-se aprender mais sobre a forma como o fogo moldou a paisagem no passado para projetar como o poderá fazer no futuro. Rego, Botelho e Bunting (1988) consideram que o fogo é reconhecidamente um fenômeno natural com o qual evoluíram muitos ecossistemas terrestres. Sobre essa ótica, Pyne (1984) ratifica que a maioria das florestas mundiais têm sido submetida à ação do fogo por milhares de anos. Rizzini (1976) afirma que muitas plantas desenvolveram adaptações morfofisiológicas que envolvem estratégias de resistência, regeneração ou sobrevivência ao fogo. Whelan (1995) relaciona como a ausência dos incêndios podem afetar as populações de animais e plantas. Bond e Wilgen (1996) reiteram nomeadamente efeitos benéficos e complexos sobre a reprodução e sobrevivência de algumas espécies que desenvolveram dependência do fogo. Nesse mesmo sentido, Rego e Botelho (1990) ressaltam o equilíbrio e a dominância das espécies em ambientes com presença do fogo recorrente.

Sob outro aspecto, é evidente que os incêndios florestais são responsáveis por inúmeros danos de diversas naturezas em todo o mundo. Incêndios florestais constituem um grande problema ambiental em uma ampla variedade de ecossistemas mundiais. Em alguns casos eles podem se tornar uma importante causa de degradação da terra (MASELLI *et al.*, 2000;. ARROYO *et al.*, 2005; ALLOZA *et al.* 2006; FERNANDEZ *et al.* 2007). Na região do Mediterrâneo atualmente os incêndios são uma grande ameaça para os ecossistemas florestais, principalmente em função da intensidade e da frequência (FRANCIS; THORNES, 1990; FERRAN; SERRASOLSAS; VALLEJO 1992; BAUTISTA; BELLOT; VALLEJO 1994; MOENCH e FUSARO, 2003 e ALESSIO *et al.*, 2008). O fogo é considerado a mais importante ameaça às florestas e zonas arborizadas da bacia do Mediterrâneo,

com uma área média queimada anualmente de aproximadamente 600.000 ha (GOLDAMMER; MUTCH 2001; KRIVTSOV *et al.*, 2009). Nesse mesmo sentido, Krivtsov *et al.* (2009) relatam que em 2007 um grande incêndio atingiu vários países da Europa, onde a Grécia e a Itália foram os países mais afetados, causando, além dos grandes prejuízos econômicos, a morte de cerca de 100 pessoas. Segundo Gill e Zylstra (2005), não há dúvidas de que as florestas de eucalipto da Austrália são altamente inflamáveis, situação agravada por estiagens, temperaturas elevadas e ventos fortes, principalmente na região norte do país, onde um incêndio, dentro de algumas horas pode alcançar proporções incontroláveis. Anualmente, nos Estados Unidos, os incêndios causam prejuízos de milhões de dólares (MERCER; PRESTEMON, 2005; KRIVTSOV *et al.*, 2009). Nos anos de 2000 e 2002, em um período de seca extrema, graves incêndios atingiram as florestas de coníferas do oeste dos EUA, causando grandes perdas econômicas (KRASNOW; SCHOENNAGEL; VEBLEN; 2009). De acordo com Stephens e Moghaddas (2005), mais de 10 milhões de hectares de florestas, no oeste dos Estados Unidos apresentam altos riscos de incêndios. Nesse mesmo contexto Krivtsov *et al.* (2009) relatam que, atualmente, o fogo é uma grande perturbação nas florestas boreais canadenses.

Diante do fato de que os incêndios apresentam inúmeros aspectos positivos e negativos, Carvalho (2005) sugere que uma das formas de compreender a dinâmica do fogo, bem como os complexos sistemas onde ele se faz presente é através do seu estudo. Nesse sentido, o estudo se inicia compreendendo o início do processo, ou seja, a combustão, que segundo Soares (1985) é resultante de uma reação química de oxidação, sendo esse fenômeno físico resultante da rápida combinação entre o oxigênio e material combustível, com a produção de luz, calor e, geralmente, chamas. Anderson (1970) acrescenta ao considerar que a dinâmica da combustão envolve três componentes básicos: inflamabilidade, combustibilidade e sustentabilidade.

De acordo com Carvalho (2005), uma das abordagens possíveis para estudar o comportamento do fogo, seria atuar na análise dos fatores preponderantes, que influenciam o seu comportamento, procedendo a sua identificação, descrição e quantificação. Arroyo, Pascual e Manzanera (2008) reiteram que o estudo do fogo no ambiente florestal inclui um amplo conhecimento científico, englobando os fenômenos atmosféricos, aspectos ecológicos, geográficos, silviculturais, para citar

apenas alguns exemplos. Morfin-Ríos, Jardel, Alvarado e Michel-Fuentes (2012) citando o triângulo do fogo, relatam que a combinação de biomassa da cobertura vegetal e uma atmosfera rica em oxigênio, (ambos, produtos da fotossíntese) e fontes de ignição, naturais ou antropogênicas, fazem com que praticamente qualquer lugar do planeta com vegetação, possa ter um incêndio desencadeado, a se considerar as condições climáticas e do material combustível. De acordo com Carvalho (2005), devem-se compreender quais os fatores que ditam a ocorrência dos incêndios florestais, a recorrência e comportamento do fogo. Gill e Zylstra (2005) relatam a complexidade envolvida ao estudar a inflamabilidade no ambiente florestal, por ser extremamente variável e dependente das circunstâncias locais, que podem se estender até o nível do ecossistema. Nesse contexto, segundo Morfin-Ríos, Jardel, Alvarado e Michel-Fuentes (2012) a caracterização, quantificação e classificação de combustíveis florestais, proporcionam informações relevantes para a gestão e manejo do fogo.

De acordo com Ottmar *et al.* (2007), a questão dos combustíveis florestais tem sido identificada como uma necessidade expressa e prioritária, para a proteção contra incêndios e pesquisas de manejo do fogo. Brown (1981) reitera sobre as dificuldades de estudar os materiais combustíveis, por serem altamente variáveis em natureza e composição, bem como, em termos de estrutura e organização espacial. Existe uma complexidade desse tema, em parte desenvolvido pela comunidade científica, principalmente para integrar informações meteorológicas, climáticas, ecológicas, emissões de gases entre certos parâmetros.

Notadamente todos esses fatores afiguram-se complexos, de difícil previsão e quantificação. Nesse contexto, deve-se refletir sobre o exposto por Carvalho (2005), que considera como principal agente desencadeador da ignição O HOMEM. E ao conseguir isso, adquiriram-se condições de compreender de forma mais completa esse fenômeno, uma vez que o homem é o principal protagonista dos incêndios florestais no mundo.

Os incêndios florestais são frequentes na Europa, com maior incidência nos países mediterrâneos do sul, onde são queimados mais de um milhão de hectares por ano (MARTINEZ; VEGA-GARCIA; CHUVIECO, 2009; SAN-MIGUEL-AYANZ; CAMIA, 2009; SAN-MIGUEL-AYANZ *et al.*, 2013). Nas últimas décadas, o número de incêndios aumentou na maioria das regiões da bacia do Mediterrâneo (MORENO; VÁZQUEZ; VÉLEZ, 1998). De acordo com Leone *et al.* (2009), 95% dos incêndios

no sul da França são causados por pessoas. Segundo Ferreira-Leite *et al.* (2013), em Portugal existem referências de grandes incêndios florestais maiores que 5000 hectares desde o séc. XIX. No entanto, em 1986 se observou o primeiro incêndio com área superior a 10000 hectares. Em 2003 foram registrados 12 dos 20 maiores incêndios do país, onde o maior consumiu 20000 hectares. Nunes *et al.* (2014) complementam, relatando que Portugal não constitui exceção, pois mais de 95% dos incêndios florestais têm a sua origem no homem. Na Espanha, em média, mais de 100000 hectares são queimados por ano e em alguns anos esse número é bastante superior, como nos anos de 1978, 1985, 1989 e 1994, onde foram queimados mais de 400000 hectares por ano. Segundo Chuvieco *et al.* (2003), não existem dados confiáveis sobre as causas reais da maioria incêndios na Espanha. No entanto, parece evidente que a grande maioria, em torno de 96%, esta ligada de uma forma ou de outra à ação humana. Muito embora a maioria dos incêndios na Austrália seja iniciada por raios, a causa humana também é considerada relevante. Segundo o governo australiano, os incêndios florestais que ocorreram no final de 2002 e início de 2003 estavam entre os mais prolongados e extensos, desde a colonização europeia. Stephens e Moghaddas (2005) descrevem que nos EUA as causas e extensão dos incêndios em áreas administradas pelo Serviço Florestal variaram significativamente, porém, a causa humana é observada principalmente na Califórnia.

No Brasil, segundo Soares, Batista e Nunes (2009), a história dos incêndios florestais teve início no ano de 1963, após a ocorrência de um grande incêndio ocorrido no estado do Paraná. Muito embora o Brasil tenha, notadamente, evoluído no desenvolvimento científico sobre o tema, a situação não é diferente da maioria dos países do mundo no que se refere às causas, pois a maioria das ocorrências também pode ser atribuída ao homem.

Sob outro aspecto, a pesquisa mundial tem também buscado descrever e avaliar as possíveis consequências dos incêndios florestais em um cenário com alterações climáticas. Nesse sentido, segundo Krawchuk *et al.* (2009), as alterações climáticas podem modificar a distribuição geográfica dos incêndios em uma escala global. No entanto, esse é um processo complexo, que apresenta variedade de gradientes espaciais e ambientais, sendo ainda, em grande parte desconhecido pela ciência. Bergona *et al.* (2010) relatam que as alterações climáticas podem apresentar consequências de vulnerabilidade para as florestas boreais localizadas

na região oriental canadense, indicando que futuramente irá ocorrer um aumento da velocidade de combustão ao longo dessa região florestal.

Bond e Keeley (2005) descrevem que o fogo, durante centenas de milhões de anos, tem ajudado a moldar biomas em escala mundial, definindo a distribuição e estrutura de comunidades vegetais suscetíveis ao fogo. Dessa forma, Allgower *et al.* (2003) afirmam que o problema pode residir no ciclo de recorrência desses fenômenos, o qual tem sido antropologicamente encurtado.

Trabalhos recentes têm começado a sintetizar tendências comuns da influência do fogo no ambiente em diferentes locais do mundo, mas a compreensão biofísica sobre a atividade global do fogo ainda é limitada (BOWMAN *et al.*, 2009). Naveh (1990) afirma que uma maior frequência do fogo pode alterar a estrutura de muitos ecossistemas dependentes do fogo. Segundo Rovira e Vallejo (1997), uma maior incidência de incêndios resultará na criação de uma nova situação ecológica, que poderá inserir áreas florestais em processos de desertificação. De acordo com Cardil *et al.* (2013), nos últimos 30 anos os incêndios florestais tornaram-se mais extremos na Espanha, com o comportamento do fogo frequentemente superior à capacidade de combate. Chmura *et al.* (2011) relatam que no noroeste dos Estados Unidos essas mudanças vão provavelmente diminuir a camada de neve, aumentar a estação do verão, a evapotranspiração e aumentar a frequência e severidade das secas.

Enfim, essa abordagem sobre “incêndios florestais” busca enfatizar, conforme descrito por Bowman *et al.* (2009), que atualmente o interesse na pesquisa do fogo tornou-se global e interdisciplinar, devido às influências, interações, e “*feedbacks*” entre os incêndios florestais e os sistemas atmosféricos, na dinâmica do clima e dos ecossistemas e inserido nesse contexto, o homem.

Nesse sentido, deve-se considerar o ser humano, como a pedra angular da temática dos incêndios florestais, primeiramente por ser o maior responsável pelas causas em todo o mundo e, ainda, por ser capaz de compreender e avaliar o seu papel, em todo esse complexo ambiente onde o fogo está inserido.

2.2 COMPORTAMENTO DO FOGO

De um ponto de vista pragmático, a investigação do comportamento do fogo justifica-se por apresentar múltiplas aplicações práticas. Entretanto, no Brasil, ainda é incipiente o número de estudos que envolvem as variáveis do comportamento do fogo em plantios comerciais, o que posiciona obstáculos à expansão gradual de trabalhos dessa natureza, tendo em vista a falta de dados para a comparação de resultados e estabelecimento de metodologias (RIBEIRO; SOARES, 1999).

O comportamento do fogo em áreas florestais é o resultado da interação entre o material combustível, ou “biomassa vegetal”, com as condições de clima e características topográficas (MORFIN-RÍOS *et al.*, 2012) e, nesse sentido, Soares e Batista (2003) reportam-se ao comportamento do fogo como sendo um complexo processo de reação em cadeia. Assim, em primeiro lugar, deve-se considerar que a combustão exerce notável influência para a compreensão do processo. Nesse intento, Morfin-Ríos *et al.* (2012) descrevem o fogo como sendo um fenômeno físico-químico, em que a energia nas ligações químicas dos compostos orgânicos é lançada como luz e calor em um processo de oxidação (FIGURA 1).

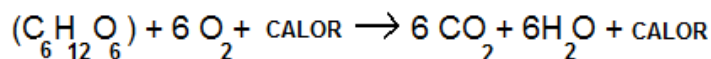


FIGURA 1 - Combustão: Liberação da energia química presente na matéria orgânica
Fonte: SOARES & Batista (2007)

Soares, Batista e Nunes (2009) reiteram que o comportamento do fogo é utilizado para descrever as principais características da combustão, referindo-se à maneira como o material combustível entra em combustão, como se desenvolvem as chamas e como o fogo se propaga, ou seja, as fases da combustão, que ocorrem simultaneamente ao longo do processo. Souza (2000) destacou a importância do material combustível para o processo da combustão, por estar presente no triângulo do fogo, no triângulo do comportamento do fogo e no triângulo do regime do fogo (FIGURA 2).

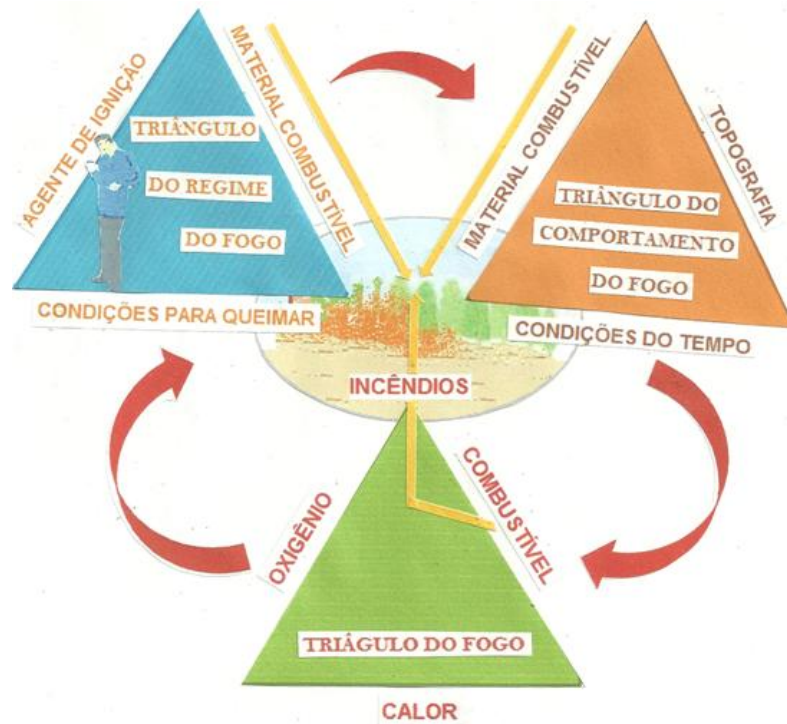


FIGURA 2 - Interação entre os triângulos que definem as condições de ocorrência, propagação e intensidade do fogo em áreas florestais
 Fonte: Souza 2000 elaborado pelo autor (2015)

Malcolm e Zylstra (2005) enfatizam que a ignição descreve o momento em que as chamas surgem no material combustível após a aplicação de uma fonte calor. Soares e Batista (2003) evidenciam que o processo de combustão em áreas florestais é difícil de ser adequadamente entendido e prognosticado. Hollis *et al.* (2011) atribuem essas dificuldades em grande parte aos combustíveis, por serem substâncias quimicamente complexas, que reagem com o oxigênio para formar dióxido de carbono, vapor de água e produzir calor. Nesse sentido, Soares e Batista (2003) acrescentam, ao descrever que os combustíveis florestais, por serem sólidos, precisam inicialmente ser convertidos ao estado gasoso antes que possam entrar em ignição. Esses gases, por sua vez, variam física e quimicamente durante os vários estágios do processo.

Fernandes e Cruz (2012) expõe que a “inflamabilidade” é a capacidade geral do combustível “vegetação” de queimar, compreendendo aspectos distintos no processo da combustão, podendo ser aferida por medidas, que por sua vez consistem na facilidade de ignição, na sustentabilidade ou tempo de residência e na combustibilidade ou taxa de propagação.

Malcolm e Zylstra (2005) ressaltam que existem diferenças nos tempos de ignição, denominadas “tempo de resposta”, variáveis entre as espécies e que podem

ser constatadas em laboratório, através da aplicação de uma fonte de ignição padrão. No entanto, o tempo de resposta de ignição é difícil de aplicar em campo, da mesma maneira como no laboratório, em função da ignição ser afetada por fatores ambientais e variáveis da vegetação. O tempo de resposta de ignição, geralmente é mais curto em materiais finos, como folhas secas.

A inflamabilidade só se manifesta em condições climáticas e de combustível particulares, sendo necessária ainda uma fonte de ignição. Fernandes e Cruz (2012) ratificam, descrevendo que a ignição e a combustão são diretamente afetadas pelas propriedades intrínsecas das partículas de combustível. Os conceitos de sustentabilidade e combustibilidade são essencialmente definidos em função do complexo de combustíveis, como a carga, o arranjo, a distribuição de tamanhos e classes diamétricas, e ainda combustíveis mortos ou vivos.

De acordo com SOARES (1979) o comportamento do fogo, é um termo geral usado para designar o que o fogo faz. BATISTA (1995), complementa, descrevendo que o fogo é o resultado da interação entre clima e condições do combustível, topografia, técnica de queima e forma de ignição.

Morandini *et al.* (2006) consideram que a grande complexidade envolvida para delinear o comportamento do fogo ocorre porque os níveis de descrição devem cobrir uma grande gama de eventos, a partir dos detalhes da cinética de combustão gasosa e da degradação térmica de combustíveis, até a caracterização físico-química de chamas e cobertura vegetal como combustível.

De acordo com Batista, Beutling e Pereira (2013), os efeitos produzidos pelo fogo em determinado lugar depende do seu comportamento, que é função das características da floresta e dos fatores ambientais. Scott (2008) reitera que um incêndio florestal é bastante variável, sendo essas mudanças responsáveis pela dificuldade em descrever o comportamento do fogo.

O estudo do comportamento do fogo é um fundamento determinante para entender os fatores que têm um papel importante no início, na propagação e na dificuldade de se extinguir os incêndios (BATISTA; BEUTLING; PEREIRA 2013). Lentile (2006) ressalta que esses fundamentos são as variáveis básicas que descrevem o comportamento do fogo: velocidade de propagação, intensidade da linha de fogo, taxa de energia liberada e tempo de residência. Soares e Batista (2007) explicam que essas variáveis quantificam e caracterizam o comportamento do fogo, bem como controlam a dificuldade de extinção de qualquer incêndio. Outras

variáveis como temperaturas máximas alcançadas nas zonas de combustão e altura de crestamento letal, além de descrever aspectos do comportamento do fogo, possibilitam estabelecer associações com o efeito produzido nos elementos do ecossistema florestal.

2.2.1 Taxa de propagação

De acordo com Soares e Batista (2003) e Soares, Batista e Nunes (2009), a taxa de propagação é o termo utilizado para descrever a taxa de incremento do fogo, tanto em área, quanto linearmente. Em estudos do comportamento do fogo, uma das variáveis mais importantes é a taxa de propagação linear ou velocidade de propagação, que pode ser medida em metros por segundo ou equivalente. A velocidade é uma das variáveis para estimar a intensidade do fogo, sendo a principal determinante de sua variação em um determinado tipo de combustível.

A velocidade de propagação do fogo pode ser medida diretamente, com o uso de um cronômetro e distâncias pré-estabelecidas. Muito embora seja um dos parâmetros mais fáceis de se medir, a velocidade de propagação é bastante variável e muito importante na previsão do comportamento do fogo (SOARES; BATISTA 2003). Segundo Botelho e Ventura (1990), a velocidade de propagação do fogo pode ser classificada conforme a escala apresentada na Tabela 1:

TABELA 1 - Classificação da velocidade de propagação do fogo

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m/s)	CLASSIFICAÇÃO
< 0,033	Lenta
0,033 – 0,166	Média
0,167 – 1,166	Alta
> 1,166	Extrema

Fonte: Botelho e Ventura (1990)

A se considerar queimas prescritas, Soares, Batista e Nunes (2009), desenvolvendo trabalhos em povoamentos de *Pinus taeda* no Paraná, obtiveram valores médios de velocidade de propagação em queimas contra e a favor do vento, além de outros parâmetros do comportamento do fogo (TABELA 2).

TABELA 2 - Velocidades médias de propagação do fogo (R) intensidade (I) e calor liberado (Ha)

FREQUÊNCIA DE QUEIMA (ano)	TÉCNICA DE QUEIMA	R (m.s ⁻¹)	I (kcal/m.s)	Ha (kcal.m ⁻²)
1	Contra o vento	0,0046	6,53	1385
	Favor do vento	0,0090	14,40	1605
2	Contra o vento	0,0055	9,51	1815
	Favor do vento	0,0109	34,36	3339
3	Contra o vento	0,0048	9,58	1561
	Favor do vento	0,0080	11,76	1416

Fonte: Soares, Batista e Nunes (2009)

2.2.2 Intensidade do fogo

De acordo com Batista, Beutling e Pereira (2013), a intensidade do fogo é a variável mais importante do comportamento do fogo, pois descreve a magnitude da combustão em termos de energia libertada. Por isso também é o parâmetro mais empregado para comparar queimas e incêndios florestais, como também é usada como parâmetro para avaliar os efeitos do fogo no ambiente.

Byram (1959) define a intensidade do fogo como a taxa de energia ou calor liberado por unidade de tempo, e por unidade de comprimento da frente de fogo.

Soares e Batista (2003) consideram que a intensidade do fogo, calculada através das equações de Byram, tem demonstrado ser um parâmetro muito útil na descrição do comportamento do fogo, além de servir como um índice de referência para se visualizar e comparar as taxas de energia liberadas em diferentes incêndios. Complementam descrevendo que a intensidade do fogo pode apresentar grande amplitude, podendo variar de 4,0 a 25.000 kcal.m⁻¹.s⁻¹ ou mais em grandes incêndios.

Wotton *et al.* (2012) descrevem que o tamanho e forma da chama são úteis para descrever as características do fogo, onde o comprimento da chama está relacionado com a taxa de produção de calor ou intensidade (BYRAM, 1959) e, portanto, a probabilidade de ocorrer incêndios de copas, como também na resistência do fogo ao seu combate ou controle. A quantidade de calor radiante e convectivo das chamas e dos seus arredores é dependente do seu tamanho, da sua forma e da sua temperatura, onde em determinadas situações a convecção de

correntes e velocidade possibilitam o deslocamento de materiais acesos para pontos distantes, iniciando outros focos de incêndios.

De acordo com Soares, Nunes e Batista (2009), a intensidade do fogo pode também ser estimada através de sua relação com o comprimento de chamas. O comprimento de chamas, por sua vez, pode ser estimado visualmente no próprio fogo ou através de fotografias, desde que se tenha alguma referência do local que possa servir de escala (FIGURA 3).

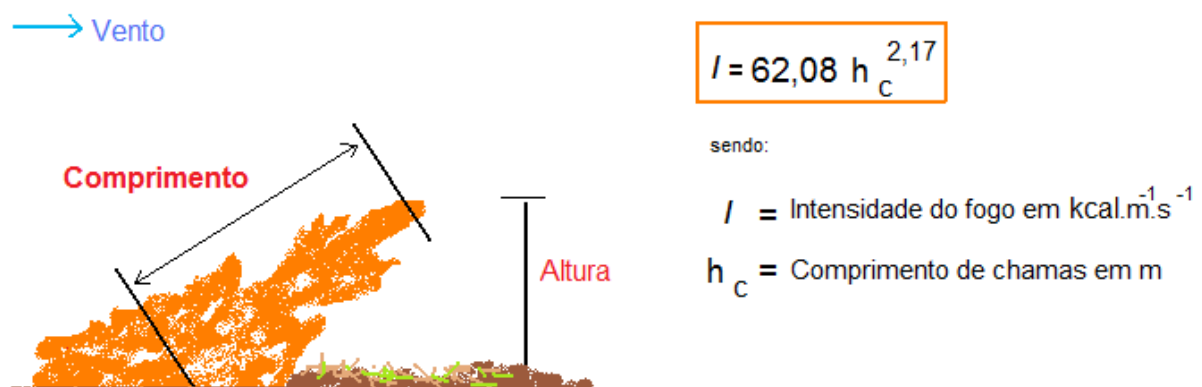


FIGURA 3 - Representação esquemática da medição do comprimento de chamas e equação para o cálculo da intensidade do fogo

Fonte: Soares, Nunes e Batista (2009) adaptado pelo autor (2015)

De acordo com Fernandes e Cruz (2012), as dimensões da chama são importantes para descrever alguns fenômenos, como a propensão do fogo atingir as copas. Batista, Beutling e Pereira (2013), em estudos sobre estimativa da intensidade do fogo, verificaram forte associação entre a intensidade e comprimento de chamas, fato comprovado e observado por vários pesquisadores, sendo possível obter uma boa estimativa da intensidade do fogo por meio das dimensões das chamas. Nesse sentido, Sullivan *et al.* (2003) e Wotton *et al.* (2012) consideram que as qualidades radiativas das chamas em incêndios (tipo de emissão, temperatura e emissividade) e as características da chama frontal (forma da chama, altura e largura) são componentes-chave na transferência de calor em modelagem de incêndios florestais.

Segundo Wotton *et al.* (2012), muito embora as chamas sejam o mais marcante e prontamente aspecto observável de um fogo florestal, elas estão mudando constantemente, em um complexo pulsante, sendo difícil medir esses

fenômenos em laboratório, e mais ainda na natureza, pois os incêndios florestais emitem grandes quantidades de calor, são parcialmente obscurecidos pela fumaça e vegetação e são potencialmente perigosos para o observador.

2.2.3 Carbonização da casca das árvores

A altura de carbonização da casca é determinada pela altura da porção vertical da casca de uma árvore que fica enegrecida pelo fogo. De acordo com Cain (1984), a “altura de carbonização da casca das árvores” pode ser usada para estimar a intensidade do fogo após sua passagem em uma determinada área.

Batista, Lima e Soares (1993) verificaram, em experimentos de queimas prescritas em *Pinus taeda*, haver uma forte associação entre a intensidade do fogo e a altura de carbonização da casca, sendo possível estimar a intensidade com o uso dessa variável. No entanto, existe uma variação significativa em função da técnica de queima, o que leva a inferir sobre a possibilidade da altura de carbonização estar mais associada à altura das chamas do que ao seu comprimento, o que prejudicaria a estimativa da intensidade do fogo quando a queima estiver sob influência do vento (TABELA 3).

TABELA 3 - Correlação entre intensidade do fogo (I) e altura de carbonização da casca das árvores (H_{cb}) de *Pinus taeda* em queimas controladas contra e a favor do vento – Paraná – Brasil

TIPO DE QUEIMA	REPETIÇÕES	CORRELAÇÃO (r) I. H_{ch}	MODELO
Indistinta	19	0,787	$I = -33,7 + 1,71 H$ $R^2 = 0,60; S_{yx} = 32,69$
Contra o vento	11	0,934	$I = -44,0 + 1,71 H$ $R^2 = 0,86; S_{yx} = 20,10$

Fonte: Batista, Lima e Soares (1993)

2.2.4 Modelagem do comportamento do fogo

De acordo com Kremens, Dickinson e Bova (2012), a gestão de incêndios florestais é complexa e multidimensional, e sob essa ótica o uso de ferramentas de avaliação de risco robustas e com maior eficiência é capital. Scott (2008) complementa ao considerar que os métodos de modelagem de fogo devem ser abastecidos com informações exatas dos combustíveis, o que levará a uma descrição mais detalhada do comportamento do fogo.

Nesse contexto, Pyne, Andrews e Laven (1996) consideram que o estudo do comportamento do fogo em incêndios florestais é um ingrediente importante para auxílio à tomada de decisão em atividades de manejo do fogo, tais como a execução de queimadas prescritas, bem como estratégias de combate ao fogo. Estudos dessa natureza envolvem o desenvolvimento de modelos para simular a propagação do fogo sobre a paisagem e integram informações acerca dos principais conjuntos de fatores diretamente relacionados com o comportamento do fogo, que são informações da vegetação, topografia e condições atmosféricas.

O desenvolvimento de um sistema bastante abrangente e versátil, para servir a uma grande variedade de fins relacionados com a inflamabilidade, para elementos de combustíveis é indescritível. Parte dessa dificuldade ocorre em função da escala dos estudos quando comparada aos incêndios, e ao número de variáveis e interações envolvidas, que multiplica a complexidade e as dificuldades em descrever o comportamento do fogo em grandes incêndios que ocorrem hoje, devido a tipos de combustível, taxas de ignição e clima. É provável que essa dificuldade permaneça por décadas, se não séculos (MALCOLM; ZYLSTRA, 2005). Nesse contexto, Pérez *et al.* (2011) relatam que o ideal é que a pesquisa esteja na escala em que ocorrem os eventos, mas isso nem sempre é possível. Embora o interesse resida em processos de grande escala, apenas dados de pequena escala estão disponíveis. Nesse sentido, Soares e Batista (2003) expõem que na pesquisa, onde muitos fatores influenciam um determinado fenômeno que se está estudando, é muito difícil avaliar o efeito separado de cada fator. Isto ocorre principalmente para o comportamento do fogo no ambiente natural. Então, a forma de abordar o problema é excluir ou manter constante todos os fatores ambientais, exceto o fator de interesse imediato, e em seguida fazer o fator variar numa quantidade conhecida e

medir o efeito no comportamento do fogo. Isto, no entanto, requer controle rígido, e considerando-se que isto é difícil de ser obtido numa escala normal, são empregados vários modelos em escala reduzida para cobrir toda variação. Scott (2012) ressalta a complexidade existente no desenvolvimento de modelos dessa natureza, uma vez que os efeitos de escala, onde características primárias do comportamento do fogo¹ irão afetar diretamente outras características como a produção de fumaça, a altura de crestamento e a severidade do fogo.

Segundo Pérez *et al.* (2011), diferentes abordagens têm sido usadas para estudar o comportamento dos incêndios florestais, seja em experimentos de laboratório ou de campo. Nesse sentido, as “expressões que descrevem as relações entre as variáveis e características do fenômeno em diferentes escalas” podem ser obtidas por comparação entre os grupos de acordo com o princípio da similaridade. A “análise dimensional” é uma técnica poderosa para lidar com a complexa física envolvida no comportamento do fogo, porque é um processo de modelagem por simplificação, onde o número de variáveis utilizadas para descrever um sistema é reduzido. Diferentes estratégias para a modelação podem ser efetuadas de acordo com o considerado nas hipóteses. Atualmente a estratégia mais comum usada na modelagem de fogo é chamada “*modeling froude*”.

Santoni *et al.* (2006) relatam haver necessidade de dados experimentais pertinentes e precisos sobre a propagação do fogo e relacionados com esse fenômeno, a fim de verificar a hipótese de modelagem ou para validar os modelos existentes, sendo essas dificuldades comumente sentidas entre a comunidade científica. Várias queimas prescritas e fogos experimentais têm sido realizados na escala de campo por equipes científicas de investigação. No entanto, as quantidades termodinâmicas que permitem caracterizar o comportamento do fogo a partir de um ponto de vista físico são pouco investigadas por pesquisadores.

Arroyo, Pascual e Manzanera (2008) expõe que o termo “modelo do comportamento do fogo” é usado para descrever o comportamento do fogo, bem como o seu potencial de evolução e efeitos, através de relações matemáticas descritas por equações. Pastor *et al.* (2003) acrescentam, enfatizando que através

¹ (velocidade de propagação do fogo, a energia liberada por unidade de área, a intensidade da linha do fogo e o comprimento das chamas)

de condições iniciais pré-estabelecidas, estes modelos projetam o cenário de desenvolvimento do incêndio, caracterizando a progressão da frente de fogo sobre a vegetação, o comprimento das chamas e a quantidade de calor produzido.

Descrever o comportamento do fogo basta alimentar o modelo com dados, que geralmente descrevem numericamente as características e parâmetros físicos para cada tipo de “vegetação”, variáveis meteorológicas e topográficas (ARROYO; PASCUAL E MANZANERA 2008). Souza (2000) complementa, descrevendo que os modelos de predição do comportamento do fogo podem ser classificados em três tipos: puramente empíricos, físicos e semi-físicos.

Soares e Batista (2003) consideram que os modelos de comportamento do fogo podem ser classificados basicamente como: físicos ou conceituais. Os modelos conceituais são desenvolvidos empiricamente, a partir de observações e coleta de informações de queimas experimentais e de incêndios. Os modelos físicos são elaborados a partir da aplicação de princípios e leis naturais da física, que depois são testados e validados em condições de campo. André e Viegas (2002) enfatizam que os modelos empíricos caracterizam-se pelo fato de a maior parte das relações que utilizam, ligando variáveis de entrada e de saída, têm caráter empírico, baseando-se num certo número de experiências de propagação de fogo, situadas dentro da zona do espaço de variáveis de entrada na qual se pretende aplicar o modelo. A forma matemática de uma relação empírica não resulta de leis físicas fundamentais aplicáveis num âmbito físico mais geral que o das experiências em causa.

O desenvolvimento de programas de computador, que integrem esses modelos com sistemas de informações geográficas, tem levado a um salto qualitativo no desenvolvimento de ferramentas computacionais, que auxiliam na tomada de decisão em manejo do fogo, tais como o sistema de previsão de comportamento do fogo Behave (ANDREWS; BEVINS; SELI, 2003) e o simulador de propagação de incêndios Farsite (FINNEY, 2004).

De acordo com Santoni *et al.* (2006), o envolvimento da física nos modelos é fundamental para a distinção dos diferentes modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), considerando cada mecanismo de transferência de calor individualmente. Tihay *et al.* (2006) descrevem que o objetivo dos modelos estatísticos e empíricos é restrito, principalmente na predição das taxas de propagação. Eles não usam qualquer modelagem física para descrever a

transferência de calor a partir da zona de queima para o combustível não queimado. Estes modelos podem ser muito eficientes para as condições ambientais e de combustível, comparáveis aos dos bancos de ensaio de incêndios utilizado para sintonizá-los, mas a ausência de uma descrição física real torna-os inaplicáveis em outras situações. Na base de uma detalhada descrição dos mecanismos de transferência de calor, que regem a propagação do fogo, os modelos físicos possuem uma grande generalidade, o que os tornam mais eficientes em situações de incêndios.

Alvarez *et al.* (2011) consideram que os modelos de comportamento do fogo são ferramentas clássicas para o estudo das relações entre a floresta e a dinâmica do comportamento do fogo e do clima. Keane, Burgan e Wagtendonk (2001) ressaltam que a inclusão de perturbações climáticas e eventos dessa natureza em modelos dinâmicos ainda apresentam uma escala grosseira, necessitando ser desenvolvidos e testados em um nível superior. De maneira geral, modelos matemáticos para descrever o fogo começaram a ser desenvolvidos a partir da década de 1940 (WOTTON *et al.* , 2012).

2.3 METEOROLOGIA

O comportamento do fogo é fortemente afetado pelas condições meteorológicas. A seguir são abordadas as principais variáveis meteorológicas associadas ao potencial de ocorrência e propagação dos incêndios florestais.

2.3.1 Precipitação

O Brasil, por ser um país de grande extensão territorial, possui diferenciados regimes de precipitação e temperatura. De norte a sul encontra-se uma grande variedade de climas com distintas características regionais (QUADROS *et al.*, 2014). De acordo com Minuzzi *et al.* (2007) a distribuição espaço-temporal das chuvas é

uma característica regional muito importante, seja para a sociedade como para a economia.

Segundo Keller, Assad e Lima (2005), na região sul do Brasil predomina o clima Subtropical Úmido, onde atuam os vórtices ciclônicos de alto nível, de origem subtropical e que provocam chuvas e ventos fortes. Além de uma complexa ação dos sistemas atmosféricos frontais do Pacífico, Argentina, sul-sudeste e nordeste e ainda, a zona de convergência do Atlântico Sul. Nimer (1979) sugere que devido à sua localização latitudinal, a região sul sofre mais influência dos sistemas de latitudes médias, onde os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano.

Segundo Souza e Ambrizzi (2003), no estado do Paraná, nos meses de junho, julho e agosto, o padrão de baixo nível atmosférico é caracterizado pela penetração para o interior da alta área de pressão com circulação anticiclônica associada, que é modulado pelo Atlântico Sul (alta subtropical movendo-se em direção ao interior do Brasil).

Dessa forma, as regiões sudeste e centro-oeste do estado do Paraná sofrem influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas (NIMER, 1979).

De acordo este autor, o clima regional do sul do Brasil apresenta notável homogeneidade, porém, para a compreensão dos processos climáticos envolvidos na região torna-se necessário um prévio conhecimento dos seus diversos fatores, alguns de ordem estática (fatores geográficos) como posição e relevo, e outros de ordem dinâmica, como os sistemas de circulação atmosféricos, que atuam simultaneamente em constante interação.

De acordo com o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2014), o Paraná situa-se em uma região de transição climática e apresenta diversos microclimas, com diferentes situações de temperatura e de precipitação ao longo do seu território, associados com variações de latitude e altitude, entretanto, ao longo de quase todo seu território, apresenta uma média anual da precipitação que varia de 1250 a 2000 mm. A quantidade e a distribuição da precipitação que incide anualmente sobre uma região é também determinante no que se refere aos aspectos econômicos, influenciando a capacidade de produção de culturas agrícolas e florestais.

2.3.2 Temperatura

Segundo Bergamaschi e Matzenauer (2014), a temperatura do ar é um dos principais fatores determinantes da fenologia das plantas, sendo que a adaptação climática de qualquer espécie vegetal tem estreita relação com seu padrão fenológico. Por sua vez, a radiação é um importante parâmetro meteorológico a ser considerado, pois é o principal mecanismo de transmissão de calor, de forma tal que as temperaturas registradas em um ponto qualquer da Terra dependerão, em primeiro lugar, do balanço de radiação nesse ponto. Nesse sentido, quando a radiação solar atinge a superfície da terra, uma parcela dessa energia é destinada para o aquecimento do ar, sendo esta definida em termos de movimento das moléculas de ar (IAPAR, 2014). O saldo de radiação vai determinar a quantidade de energia disponível no meio e que será utilizada em diversos processos como, por exemplo, na transmissão de calor por convecção, advecção e evaporação (SOUZA; CARFAN; NERY, 2012). De maneira geral, as condições térmicas influenciam os mais diversos processos vitais das plantas, sendo a temperatura um dos fatores fundamentais no seu desenvolvimento e crescimento (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Segundo o IAPAR (2014), as condições energéticas do ambiente, mais especificamente do solo e da atmosfera, são fundamentais nos processos biofísicos e bioquímicos que por sua vez condicionam o metabolismo e desenvolvimento dos seres vivos.

De acordo com as cartas climáticas produzidas pelo IAPAR (2014), a região sudeste do estado do Paraná apresenta temperaturas médias anuais entre 17 e 18 °C, e ainda, temperaturas médias de 13 a 14 °C referentes ao trimestre mais frio (junho, julho e agosto) e temperaturas entre 23 e 24°C para o trimestre mais quente compreendido pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

2.3.3 Vento

De acordo com Jervell (2008), os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devidas ao fato de, em primeiro lugar, a radiação solar recebida na Terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares e, em segundo lugar, ao movimento de rotação da Terra e variações sazonais de distribuição de energia solar incidente. Picolo, Rühler e Rampinelli (2014) descrevem que, como a radiação solar não se distribui igualmente pela superfície terrestre, algumas porções da atmosfera são mais aquecidas, tornando-se menos densas e tendendo a subir em direção às camadas superiores. O espaço deixado pela porção ascendente é logo ocupado por massas de ar menos aquecidas, formando-se assim as correntes de vento.

A caracterização do vento em qualquer ponto é expressa por dois parâmetros: a direção e a velocidade (NUNES, 2005). A velocidade do vento é uma grandeza vetorial, da qual se medem normalmente parâmetros de sua componente horizontal. Os parâmetros medidos são: velocidade, direção e força do vento (SOARES; BATISTA, 2004). De acordo com Nunes (2005), a velocidade do vento é expressa em metros por segundo ($m.s^{-1}$), em quilômetros por hora ($km.h^{-1}$) ou em *knots* (kt). Segundo Pereira *et al.* (2008), na maior parte do estado do Paraná ocorre a predominância de ventos nordeste (NE), no entanto, no período correspondente ao inverno e principalmente na véspera de ocorrência de geadas, o sentido predominante é sudoeste (SW) para a maioria do estado.

A velocidade do vento é dependente do gradiente barométrico, da força de atrito sobre o solo e da densidade do ar (NUNES, 2005). Jervell (2008) afirma que os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem em bandas situadas à cerca de 10 km da superfície da terra. Assim, segundo Nunes (2005), quanto maior for a força de rugosidade da superfície provocada pelo relevo, edifícios e vegetação, menor será a velocidade do vento. Jervell (2008) afirma que isso se deve ao fato de que o vento é diretamente afetado por forças de atrito² o que provoca uma diminuição na sua velocidade.

² (devido à fricção da massa de ar em movimento com a superfície terrestre)

2.3.4 Umidade relativa do ar

O ar é uma mistura de gases, sendo o ar seco composto principalmente por nitrogênio, oxigênio e argônio, além de outros componentes como dióxido de carbono, hidrogênio, hélio, néon e outros (PACHECO; MARCONDES-HELENE, 1990). Segundo Costa (2003), além desses componentes, o ar atmosférico sempre contém vapor d'água em quantidade variável. Varejão-Silva (2006) expõe que essa variação do teor de vapor d'água na atmosfera é fortemente influenciada pela temperatura e pode apresentar valores entre 0 a 4% do volume de ar. Sendo 4% o máximo de vapor d'água que uma dada massa de ar pode reter. Nesse sentido, Ayoade (1996) descreve que este vapor d'água pode ser medido em índices como umidade absoluta, temperatura do ponto de orvalho, pressão do vapor d'água e umidade relativa, sendo esta a mais conhecida, devido à facilidade de obtenção dos dados, além de indicar o grau de saturação do ar.

Dessa forma, Nunes (2005) reitera que a umidade relativa do ar é a razão, expressa em porcentagem, entre a quantidade de umidade para um volume de ar e a quantidade total que aquele volume pode manter no estado de vapor para uma dada temperatura e pressão atmosférica.

O processo de evaporação da água consome energia, que é transferida para a atmosfera terrestre. À medida que as massas de ar são transportadas para as camadas mais altas da atmosfera, ocorre a condensação do vapor d'água, com formação de nuvens e liberação de energia consumida na evaporação. Por meio desse processo contínuo é que a temperatura do globo terrestre é mantida dentro dos atuais limites. A presença de vapor d'água na atmosfera contribui também para diminuir a amplitude térmica³ uma vez que a água intercepta parte da radiação terrestre de ondas longas emitida pela Terra, desta forma, diminui o resfriamento noturno (IAPAR, 2014).

De maneira geral, o estado do Paraná apresenta a região litorânea com médias anuais de umidade relativa do ar mais elevadas, entre 80 e 85%, e a região sudeste e boa parte da região central do estado com médias entre 70 e 75% (IAPAR, 2014).

³ (diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima)

2.4 ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

Existe uma distinção conceitual entre risco e perigo de incêndios. Risco de incêndios (*fire risk*) está relacionado com a probabilidade de um incêndio iniciar em função da presença e / ou atividade de agentes causadores, enquanto perigo de incêndios (*fire hazard*) está relacionado com as características do material combustível⁴ que o predispõe à ignição ou representam dificuldade para a extinção do incêndio SOARES; BATISTA, 2007).

Segundo Countryman (1966), os índices de perigo de incêndios são números que indicam a probabilidade de ocorrer um incêndio, assim como a facilidade do mesmo se propagar. Neste intento, Sharples *et al.* (2008) descrevem índices de perigo como instrumentos utilizados para avaliar o potencial de ocorrência de incêndios florestais, a propagação do fogo e dificuldade de supressão de fogo.

Sensível avanço pode ser observado ao longo dos últimos anos, diante do empenho dos pesquisadores em avaliar as complexas interações entre os fatores climáticos e os incêndios florestais, muitas vezes motivados por situações catastróficas enfrentadas, como por exemplo, o desenvolvimento do índice FMA, em 1972, motivado em função de um grande incêndio ocorrido no estado do Paraná.

De acordo com Levin e Saaroni (1999), estudos têm indicado que vários fatores climáticos estão correlacionados com o desenvolvimento de incêndios florestais em todo o mundo. No Canadá, Flannigan e Harrington (1988) verificaram variação na proporção e intensidade dos incêndios em função da estiagem e baixa umidade relativa combinado com altas temperaturas. Balling, Meyer e Wells (1992) e Ramos e Ventura (1992) encontraram correlação negativa entre a chuva de verão e os incêndios florestais no Parque de Yellowstone e em Portugal. Do mesmo modo, Brotak e Reifsnyder (1977), Beer (1991), Kondo e Kuwagata (1992) e Levin e Saaroni (1999) descrevem que a velocidade do vento é um elemento crucial para a propagação de incêndios florestais e situações com ventos acima de 9 m.s^{-1} devem ser consideradas muito perigosas. Incorporado nessa conjuntura, Levin e Saaroni (1999), ao analisar os incêndios ocorridos entre 1987 e 1995 em Israel, também encontraram alta correlação entre a precipitação e umidade relativa do ar com o

⁴ (tipo, quantidade, umidade, arranjo e continuidade)

comportamento do fogo, como também concluíram que o maior incêndio ocorrido na história do país, em 1995, foi agravado por perturbações atmosféricas e um sistema atmosférico estacionário.

Holsten *et al.* (2013) reiteram que os índices de perigo de incêndios florestais, foram desenvolvidos para prever as condições favoráveis às ocorrências, servindo como uma importante ajuda para gestores de florestas, possibilitando adoção de medidas preventivas adequadas e proporcionando melhores condições de gestão quando os incêndios ocorrerem.

Ante o fato, já amplamente difundido entre os pesquisadores de que os incêndios florestais são fortemente influenciados por condições climáticas, havendo uma estreita relação entre variáveis meteorológicas e ocorrência de incêndios (GANATSAS; ANTONIS; MARIANTHI, 2011), Torres (2002) acentua que o amplo conhecimento do clima é um problema crítico na avaliação do perigo de ocorrências de incêndios, considerando ainda, que as condições meteorológicas podem dimensionar o potencial dos incêndios.

Soares (1998) assinala outro importante aspecto a ser considerado para a utilização de um índice de perigo e refere-se à disponibilidade de informações necessárias para efetuar o cálculo, considerando ainda que os problemas dessa natureza são as principais restrições à introdução de índices mais complexos, como o Canadense (Canadian Forestry Service 1970) e o Nacional dos Estados Unidos (DEEMING *et al.*, 1972) no Brasil.

De acordo com Soares (1984), a estrutura dos índices de perigo de incêndio é baseada na variação de alguns fatores meteorológicos. Nesta essência Ganatsas, Antonis e Marianthi (2010) declaram que a precipitação, a temperatura do ar, a umidade relativa e a velocidade do vento são as principais entradas em vários índices de perigo de incêndios.

Em anuência ao apresentado por Soares (1984), podem-se distinguir dois tipos de fatores determinantes do grau de perigo do incêndio: fatores de caráter permanente (material combustível, tipo de floresta e relevo) e os fatores variáveis (condições climáticas).

Para atender as necessidades atuais e futuras, tanto brasileiras quanto mundiais, é recomendável adequar o conhecimento e a pesquisa dentro das novas tendências. Dessa forma, de acordo com Borges *et al.* (2011), acredita-se que o ideal seja aproveitar as experiências bem sucedidas, todavia com aprimoramento e

adequação às condições locais. Nesse cenário, pesquisadores de todo o mundo e principalmente de países onde as adversidades intrínsecas aos incêndios são maiores, têm avançado no sentido de integrar cada vez mais os fatores de caráter permanente em seus modelos. Sharples *et al.* (2008) citam como exemplos alguns índices usados no mundo, tais como o Índice de McArthur (FFDI) que foi desenvolvido na década de 1960, em uso na Austrália Oriental e ainda, modelos desenvolvidos por Sneeuwjagt e Peet (1985) e Beck (1995) usados no oeste da Austrália, no Canadá por VanWagner e Pickett (1985) e Van Wagner (1987), nos Estados Unidos por Lancaster (1971), Rothermel (1972), Fosberg, (1978), Goodrick (2002), entre outros.

Ganatsas, Antonis e Marianthi (2011) também relatam que inúmeros testes de modelos e pesquisas podem ser verificados atualmente no mundo, onde a pesquisa visa aprimorar as ferramentas de gestão de risco. Holsten *et al.* (2013) narram que na Alemanha dois índices com base em dados meteorológicos foram desenvolvidos na década de 60 para avaliar o perigo de incêndios em uma base diária, o M-68, e o Baumgartner Index (este último foi utilizado na antiga Alemanha Ocidental). Atualmente o M-68 (modificado) é o índice padrão utilizado, tendo sido recentemente avaliado o desempenho de 5 índices para 13 estados. Os índices com melhor desempenho foram em ordem decrescente: o alemão modificado M-68, o *Canadian Weather Index* e o Angström. Atualmente tem-se procurado integrar informações para melhorar o desempenho do M-68. Nessa mesma linha de pesquisa, Ganatsas, Antonis e Marianthi (2011) avaliaram os índices Keetch-Byram (KBDI), que comumente é usado em silvicultura, o índice de Nesterov (NI), o índice Nesterov modificado (MNI), o índice Zhdanko (ZI) e o Índice Sueco de Angström para toda a região do mediterrâneo, realizando coletas de material combustível simultaneamente e avaliando seus respectivos teores de umidade, para também compor essas informações com os índices não cumulativos.

Silva e Pontes (2011) desenvolveram um índice de perigo de incêndio para a cidade de Rio Branco (AC), onde que, para a sua concepção foram empregadas variáveis *fuzzy*⁵ em um sistema dinâmico, usando como variáveis a umidade relativa

⁵ (Esta teoria foi introduzida em 1965 pelo matemático Lotfi Asker Zadeh, com a intenção de dar um tratamento matemático a certos termos linguísticos subjetivos como: “aproximadamente”, “em torno de”, dentre outros. Pode-se dizer que a Teoria dos Conjuntos Fuzzy representa um primeiro passo no sentido de se

do ar e precipitação. Ao comparar os resultados desse novo índice com a FMA, obtiveram resultados semelhantes. No entanto, a FMA, por ser acumulativo para valores não nulos, apresentou um crescimento mais gradual dos índices e com menores valores quando comparado com o sistema *fuzzy*.

Diante de tantas análises e comparações, atualmente desenvolvidas no mundo inteiro, de acordo Soares (1998), a melhor maneira de comparar o desempenho de diferentes índices de perigo de incêndio é submetê-los aos mesmos dados meteorológicos e de ocorrência de incêndios.

Soares (1984) descreve que os índices de perigo de incêndios podem ser divididos em dois grupos:

- **a) Índices de ocorrência** - indicam a probabilidade de ocorrência de um incêndio (condições favoráveis ou não para o início da combustão) e normalmente se utilizam dos fatores variáveis.
- **b) Índices de propagação** - indicam, além da probabilidade, o comportamento dos incêndios florestais e utilizam fatores como a velocidade do vento.

A seguir são descritos os principais índices de perigo de incêndios utilizados no Brasil:

2.4.1 Índice de Angström (B)

O índice de Angström foi desenvolvido na Suécia, mais especificamente para a Escandinávia. Ele baseia-se unicamente na temperatura e na umidade relativa do ar, ambos medidos às 13:00 horas, e pode ser considerado o mais simples (CHANDLER *et al.*, 1983).

$$B = 0,05.H - 0,1.(T - 27)$$

onde:

B = Índice de Angstron;

H = umidade relativa do ar em porcentagem;

T = temperatura do ar em °C.

De acordo com Soares (1984), a interpretação do índice é feita da seguinte maneira: sempre que o valor de “B” for menor do que 2,5 haverá perigo de incêndios, isto é, as condições atmosféricas do dia estarão favoráveis à ocorrência de incêndios.

2.4.2 Índice de Nesterov (G)

Segundo Soares (1984), este índice foi desenvolvido na ex-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e aperfeiçoado na Polônia. Apresenta como variáveis a temperatura e o déficit de saturação do ar. Chandler *et al.* (1983) acrescenta, relatando que ele foi desenvolvido inicialmente para áreas boreais.

O índice de Nesterov, por considerar a precipitação diária, é acumulativo, apresenta relação com o material combustível em função do déficit de saturação do ar (CHANDLER *et al.*, 1983).

O cálculo do índice é desenvolvido da seguinte forma (SOARES, 1984):

$$G = \sum_{i=1}^n d_i - t_i$$

onde:

G = Índice de Nesterov;

d = déficit de saturação do ar em milibares;

t = temperatura do ar em °C;

n = número de dias sem chuva menor que 10,0 mm.

O déficit de saturação do ar, por sua vez, é igual à diferença entre a pressão máxima de vapor d'água e a pressão real de vapor d'água, podendo ser calculado por meio da seguinte expressão:

$$d = E (1 - H/100)$$

onde:

d = déficit de saturação do ar em milibares;

E = pressão máxima de vapor d'água em milibares;

H = umidade relativa do ar em porcentagem.

No índice de Nesterov, a continuidade do somatório é limitada pela ocorrência das restrições apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 - Restrições do índice de Nesterov em função da quantidade de chuva do dia

CHUVA DO DIA (mm)	MODIFICAÇÃO NO CÁLCULO
≤ 2,0	Nenhuma
2,1 a 5,0	Abater 25% no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
5,1 a 8,0	Abater 50% no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomençar novo cálculo, isto é, G = (d.t) do dia.
> 10,0	Interromper o cálculo (G=0), recomençando a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessar.

Fonte: Nunes (2005)

A interpretação do grau de perigo estimado pelo índice é feito por meio de uma escala de perigo (TABELA 5).

TABELA 5 - Escala de perigo do índice de Nesterov (G)

VALOR DE G	GRAU DE PERIGO
≤ 300	Nenhum risco
301 a 500	Risco pequeno
501 a 1000	Risco médio
1001 a 4000	Grande risco
> 4000	Altíssimo risco

Fonte: Nunes (2005)

2.4.3 Fórmula de Monte Alegre (FMA)

A FMA é um índice acumulativo que utiliza duas variáveis: uma de forma direta, a umidade relativa do ar, medida às 13:00 h e outra de forma indireta, a precipitação diária. Sua equação básica é a seguinte (SOARES; BATISTA, 2007):

$$FMA = \sum_{i=1}^n (100 / Hi)$$

onde:

FMA = Fórmula de Monte Alegre

Hi = umidade relativa do ar em porcentagem, medida às 13:00 horas;

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

Por ser acumulativo no que se refere à umidade relativa, o índice está sujeito a restrições de precipitação, como mostra a Tabela 6.

TABELA 6 - Restrições da Fórmula de Monte Alegre (FMA) em função da quantidade de chuva 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 o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.

Fonte: Soares e Batista (2007)

A interpretação do grau de perigo estimado pela Fórmula de Monte Alegre é feita por meio de uma escala, como apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 - Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre

VALOR DE FMA	GRAU DE PERIGO
≤ 1,0	Nulo
1,1 a 3,0	Pequeno
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20,0	Alto
> 20,0	Muito alto

Fonte: Soares e Batista (2007)

2.4.4 Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺)

Considerando que a velocidade do vento é uma variável meteorológica que possui influência na propagação de um incêndio florestal, a sua inclusão na FMA é de grande importância para o seu aperfeiçoamento, proporcionando uma ferramenta de gestão eficiente, atendendo amplamente as necessidades que anteriormente eram restritas a outros modelos. Baseado nesta premissa, Nunes, (2005) aperfeiçoou a FMA, incluindo a variável velocidade do vento, resultando em um novo índice: a Fórmula de Monte Alegre alterada (FMA⁺).

A característica de ser um índice acumulativo baseado na umidade relativa foi mantida, no entanto, o fator de propagação foi obtido com base na velocidade do vento das 13:00 h, não sendo acumulativo. As restrições referentes à precipitação permaneceram as mesmas da FMA (TABELA 8).

TABELA 8 - Restrições da FMA⁺ em função da quantidade de chuva 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 o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.

Fonte: Nunes (2005)

A interpretação do grau de perigo estimado pela FMA⁺ é feita por meio de uma escala, como apresentado na Tabela 9.

TABELA 9 - Interpretação do grau de perigo pela FMA⁺

VALOR DE FMA ⁺	GRAU DE PERIGO
≤ 3,0	Nulo
3,1 a 8,0	Pequeno
8,1 a 14,0	Médio
14,1 a 24,0	Alto
> 24,0	Muito alto

Fonte: Nunes (2005)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido nas dependências do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEEPCCS), localizado no município de Irati (PR), a aproximadamente 1 km da rodovia BR-153, a 3 km do centro da cidade de Irati e a 140 km de Curitiba.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE, (2014), a cidade de Irati está situada no segundo planalto paranaense, região sudeste do estado do Paraná, na latitude de 25° 28' 46" S e longitude 50° 39' 04" W, com altitude média de 880 m (FIGURA 4).

O CFEEPCCS ocupa uma área de 145 hectares, distribuída entre florestas, cultivos florestais de Pinus, Eucaliptos entre outras espécies, além das áreas ocupadas pelas instalações de ensino.

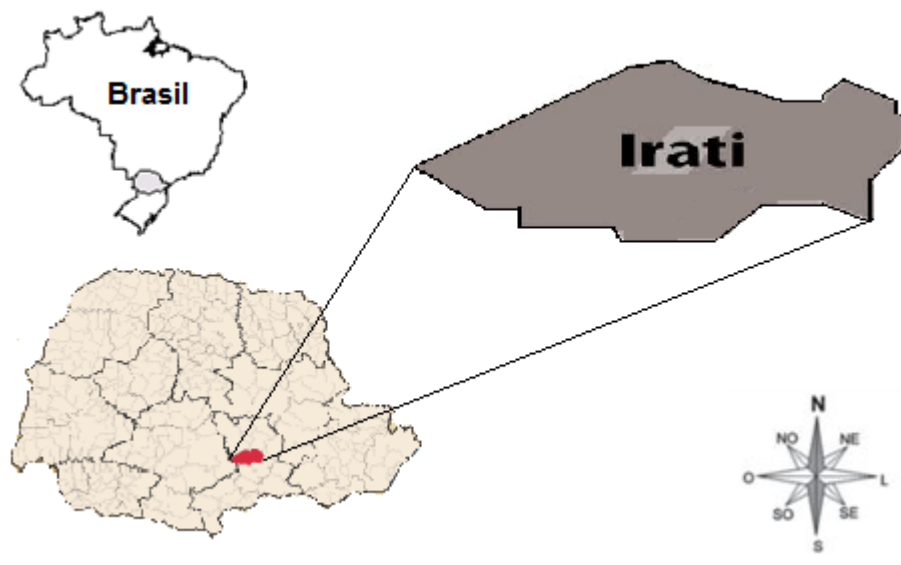


FIGURA 4 – Localização geográfica do município de Irati (PR)
Fonte: IBGE 2014 adaptado pelo autor (2015).

O trabalho foi desenvolvido em 3 talhões de *Pinus taeda*, todos com topografia plana e espaçamento de 2,00 x 2,70 m e solo classificado como Cambissolos Háplicos Tb Distróficos, de acordo com a Empresa Brasileira de

Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (2013). A seleção das unidades produtivas amostradas é apresentada na Figura 5 e foi feita após incursões pela área do Colégio Florestal, onde foram observadas as características dos povoamentos bem como condições de acesso, topografia e solos. Outro fator para a seleção das áreas foi baseado na análise dos registros históricos das áreas, onde foram selecionados talhões sem registro de ocorrência de incêndios ou queima controlada.

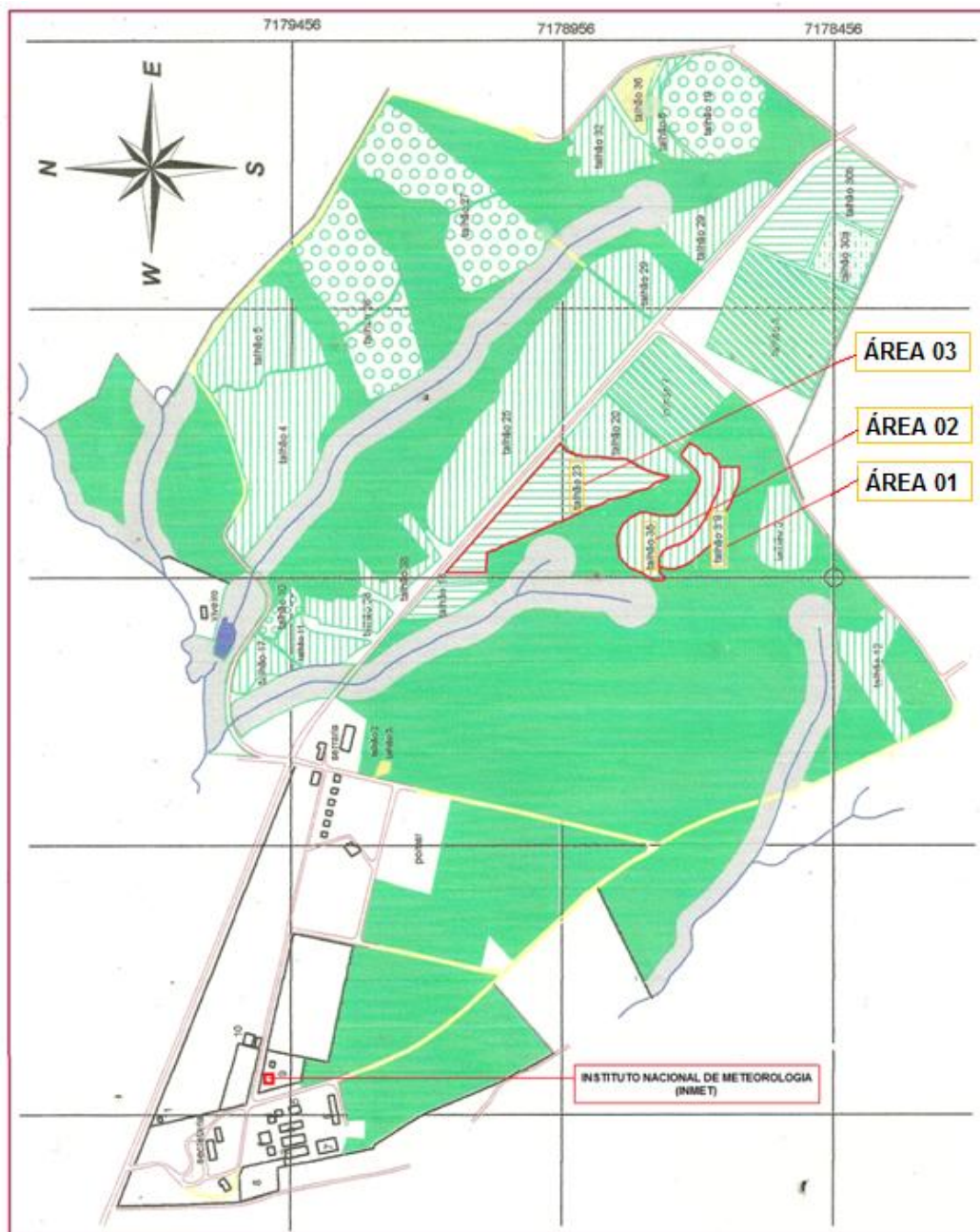


FIGURA 5 - Mapa de uso do solo do CFEPPCS em Irati (PR), com indicação dos talhões amostrados e localização da estação meteorológica convencional do INMET
Fonte: CFEPPCS adaptado pelo autor (2015).

3.1.1 Características dos povoamentos

O experimento foi conduzido nos talhões 39, 35 e 23 que foram denominados área 01, área 02 e área 03 respectivamente.

Área 01

Povoamento de *Pinus taeda* com área de 1,5 hectares, 5 anos de idade, implantado em área de capoeirinha, após roçada de limpeza e coroamento, com mudas provenientes de sementes clonais de Ijuí (RS). A área apresentava diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 12 cm, altura média de 8 metros, área basal de 20,95 m² e poda até 2 metros de altura realizada em 2010 (FIGURA 6).



FIGURA 6 - Vista da área 01: *Pinus taeda* com 5 anos de idade
Fonte: o autor (2015)

Área 02

Povoamento de *Pinus taeda* com 3,5 hectares, 8 anos de idade, implantado em 2004 com uso do fogo para limpeza do terreno, mudas clonais de Ijuí (RS).

Apresentava DAP médio de 16 cm e altura média estimada de 11 metros, área basal de 37,23 m² e poda até 2,5 metros de altura feita em 2008 (FIGURA 7).



FIGURA 7 - Vista da área 02: *Pinus taeda* com 8 anos de idade
Fonte: o autor (2015)

Área 03

Povoamento de *Pinus taeda* com área de 5,5 hectares, 11 anos de idade, implantado no início de 2001 com uso de herbicida e fogo, DAP médio de 19 cm, altura média estimada de 13 metros, primeira poda até 2,5 metros de altura em 2005 e segunda até 5 metros em 2010 (FIGURA 8).



FIGURA 8 - Vista da área 03: *Pinus taeda* com 11 anos de idade
Fonte: o autor (2015)

3.1.2 Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região de Irati é caracterizado como Cfb (FIGURA 9), com temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C, onze meses com temperatura superior a 10 °C e com mais de cinco geadas por ano. As chuvas são uniformemente distribuídas, com precipitação de 1.100 a 2.000 mm (BATISTA, 1995; MAACK, 2002 e PEREIRA, 2009).



FIGURA 9 - Classificação climática do Estado do Paraná segundo Köppen e localização do município de Irati (PR)

Fonte: Adaptado de IAPAR (2014)

3.2 METODOLOGIA

Para a realização da pesquisa foi elaborado um planejamento de atividades ordenado em etapas. Primeiramente foi selecionada a área para instalação do experimento em campo. Posteriormente foram obtidos, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os dados meteorológicos da região, de sua estação localizada em Irati - PR.

A estação do INMET de Irati está localizada dentro das dependências do CFEEPCS, a aproximadamente 2 km do experimento. É uma das 291 estações meteorológicas convencionais do órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e

Abastecimento, em operação desde o ano de 1966. É importante ressaltar que as estações meteorológicas convencionais do INMET não adotam horário de verão e utilizam o Tempo Universal Coordenado (TMG)⁶. Outro aspecto que deve ser observado é que as estações meteorológicas convencionais apresentam 3 medições diárias, sendo elas as 21:00, 9:00 e 15:00 horas, sendo necessário o ajuste das variáveis meteorológicas de interesse para o horário das 13:00 horas para o cálculo da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺).

Após trabalhar esses dados foram feitas as análises das variáveis meteorológicas para a região e o cálculo da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺). Com base nessa análise foram programadas as datas para a instalação do experimento em campo e coleta de dados. Em seguida foram realizadas as atividades de laboratório e análises estatísticas.

3.2.1 Dados Meteorológicos

O estudo das variáveis meteorológicas fornecem indicativos sobre as condições de temperatura e pluviosidade esperadas. Sabendo-se que as condições climáticas interagem de forma significativa com o material combustível, bem como com o comportamento do fogo, os dados, compreendendo o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011 foram processados, selecionando-se as variáveis de interesse para a realização das análises. A forma como os dados foram fornecidos é apresentada nas Tabelas 10 e 11.

TABELA 10 - Variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo INMET

Período solicitado dos dados: 01/01/2008 a 31/12/2012								
Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP								
Estacao	Data	Hora	TempBulboSeco	TempBulboUmido	UmidadeRelativa	DirecaoVento	Veloc.Vento	Nebulosidade
83836	01/01/08	0	18.4	18	96	9	1.8	10
83836	01/01/08	1200	19.8	18.8	91	9	0.5	9
83836	01/01/08	1800	21.8	20.3	88	9	5	10
83836	02/01/08	0	19.4	18.8	94	18	1.6	10
83836	02/01/08	1200	20.2	18.8	87	9	1.6	7
83836	02/01/08	1800	25.9	21.5	68	9	1.1	6

Fonte: INMET (2012)

⁶ menos 3 horas durante o ano inteiro.

TABELA 11 - Variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo INMET

Estação : IRATI - PR (OMM: 83836)			Latitude (graus) : -25.46			
			Longitude (graus) : -50.63			
Início de operação: 24/09/1966			Altitude (metros): 836.95			
Estacao	Data	Hora	Precipitacao	Temp Comp Media	Umidade Relativa Media	Velocidade do Vento Media
83836	01/01/08	0		20.46	91.75	2.366667
83836	01/01/08	1200	61.8			
83836	02/01/08	0		20.46	87.75	0.9
83836	02/01/08	1200	9.8			
83836	03/01/08	0		20.9	95	0.5
83836	03/01/08	1200	11.1			

Fonte: INMET (2012)

Os dados meteorológicos foram processados com auxílio do *software Excel* seguindo as seguintes etapas: primeiramente o horário disposto em Tempo Universal Coordenado (TMG) foi alterado para o horário de Brasília. Posteriormente foram selecionadas as variáveis de interesse para as análises meteorológicas e para o cálculo do índice de perigo de incêndios (FMA⁺).

3.2.2 Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺)

Os dados meteorológicos, compreendendo o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011, foram utilizados para determinar o índice de perigo de incêndios (FMA⁺) diário, de acordo com a equação geral da FMA⁺ desenvolvida por (NUNES, 2005):

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n (100 / H_i) e^{0,04 v}$$

onde:

FMA⁺ = Fórmula de Monte Alegre Alterada;

H = umidade relativa do ar em porcentagem, medida às 13 horas;

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

v = velocidade do vento em m.s⁻¹, medido às 13 horas;

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

Para calcular a (FMA⁺) foram selecionadas a umidade relativa do ar, a precipitação acumulada diária e a velocidade do vento às 15:00 horas (TABELA 12). Os dados de umidade relativa do ar das 15:00 horas foram ajustados para as 13:00 horas de acordo com a equação desenvolvida por Nunes, Soares e Batista (2005):

$$UR_{13} = 2,451510 UR_{15}^{0,796072}$$

onde:

UR₁₃ = Umidade Relativa das 13:00 horas.

UR₁₅ = Umidade Relativa das 15:00 horas.

TABELA 12 - Estimativa da umidade relativa do ar das 13:00 horas e cálculo do índice de perigo de incêndios FMA⁺ para o período de 2008 a 2011

ESTIMATIVA DA UR% 13 E CALCULO DO ÍNDICE DE PERIGO DE INCÊNDIOS FMA + (2008 - 2011)								
Data	Precipitação	Vento	UR(%) 15h	UR(%) 13h	100/H	FMA ⁺	Classificação	Grau FMA ⁺
01/01/08	61.8	5	88	86,5728827	1,155096	0,0	Nulo	1
02/01/08	9.8	1,1	68	70,5086995	1,418265	0,0	Nulo	1
03/01/08	11.1	0	91	88,9143112	1,124678	0,0	Nulo	1
04/01/08	28.4	2,5	70	72,1546885	1,385911	0,0	Nulo	1
05/01/08	2.9	2,1	65	68,0210342	1,470133	0,0	Nulo	1
06/01/08	6.8	0	60	63,8219532	1,566859	0,0	Nulo	1
07/01/08	0.1	1,1	67	69,6820132	1,435091	0,0	Nulo	1
08/01/08	0	1,1	53	57,8204423	1,729492	1,8	Nulo	1
09/01/08	0	2,1	47	52,5465195	1,903076	4,0	Pequeno	2
10/01/08	0	2,1	55	59,5508104	1,679238	5,8	Pequeno	2
.								
.								
.								

Fonte: o autor (2015)

Os resultados obtidos após as análises da distribuição dos graus de perigo da FMA⁺ foram utilizados para planejar o período de coleta de dados em campo. Para as análises de correlação e para o desenvolvimento dos modelos matemáticos de estimativa do comportamento do fogo, o índice foi incorporado nas equações de acordo com os valores diários ou de acordo com o grau de perigo de incêndio (TABELA 13).

TABELA 13 - Graus de perigo FMA⁺ utilizados nos ajustes dos modelos matemáticos desenvolvidos

GRAU DE PERIGO FMA ⁺	VALOR UTILIZADO
Nulo	1
Pequeno	2
Médio	3
Alto	4
Muito alto	5

Fonte: o autor (2015)

3.2.3 Instalação do experimento e coletas de campo

Para a instalação do experimento em campo buscaram-se as áreas que apresentavam maior representatividade para os povoamentos. A fase de coleta de dados em campo foi desenvolvida no período do inverno de 2012, com início no dia 24 de agosto e término no dia 21 de setembro. Essa época foi definida com base nas análises do índice de perigo de incêndios FMA⁺, que indicou o período do inverno como sendo o mais crítico nos aspectos relacionados aos incêndios florestais para a região.

A extensão do experimento totalizou aproximadamente 4500 m², divididos em 3 áreas, denominadas: área 01 (*Pinus taeda* com 5 anos de idade), área 02 (*Pinus taeda* com 8 anos de idade) e área 03 (*Pinus taeda* com 11 anos de idade).

Em cada área foram instaladas 50 unidades amostrais, denominadas “parcelas”, totalizando 150 parcelas ao longo do experimento. Cada parcela era composta por uma área de 3,0 m de largura por 10,20 m de comprimento (sendo 20 cm correspondente à faixa de ignição) e, ainda, por 6 amostras de material combustível que eram coletadas antes (3 amostras) e depois da queima (3 amostras).

Para a instalação das parcelas utilizou-se uma corda com 10,20 m, (com marcação de 1 em 1 m) para delimitar o comprimento e 2 balizas com 3 m para delimitar a largura. Da delimitação das parcelas foi feita com o uso de uma pá cortadeira para cortar o material combustível e um rastelo para retirar o material presente entre as parcelas, bem como para isolar as áreas a serem queimadas do restante do povoamento. Esse procedimento sempre foi realizado no período da manhã, uma vez que as coletas de material combustível e posterior queima das parcelas eram iniciadas às 13:00 horas. A largura das faixas (aceiros) entre as

parcelas variou de 0,5 até 1,5 m de largura. A Figura 10 mostra um esquema representativo da instalação do experimento em campo.

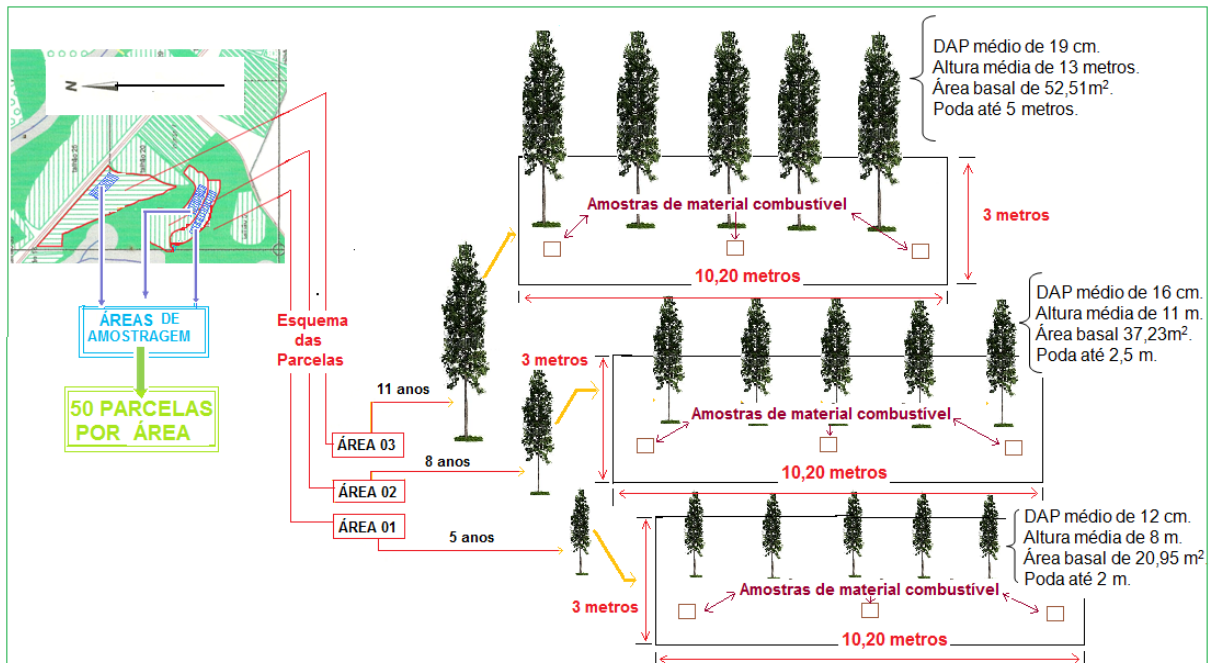


FIGURA 10 - Representação esquemática do experimento instalado nos talhões 23, 35 e 39 do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CFEPPCS) em Irati (PR)

Fonte: o autor (2015)

Para a coleta e classificação de material combustível (“*litter*”) foram utilizadas amostras de 900 cm^2 ($30 \times 30\text{ cm}$). A delimitação dessas amostras foi feita com auxílio de um gabarito de madeira e uma faca. Em cada parcela foram coletadas 6 amostras de material combustível, sendo 3 antes da queima e 3 após a queima. O material combustível presente dentro de cada amostra foi agrupado em classes diamétricas, de acordo com Brown, Oberhew e Zohnsten (1982) com o auxílio de um medidor de diâmetros.

O material combustível coletado apresentou duas classes de tamanho, denominadas “Classe L”, com diâmetro de 0 a 0,7 cm e “Classe LB” com diâmetro de 0,71 a 2,5 cm. Material com diâmetro superior a 2,5 cm não foi encontrado.

A alocação das amostras dentro de cada parcela seguiu um padrão determinado em função da linha de ignição, sendo posicionadas ao lado direito da linha de ignição, distribuídas a aproximadamente 1,0 m, 5,0 m e 9,0 m do comprimento da parcela e a aproximadamente 50 cm da borda (largura da parcela) (FIGURA 11).

O material combustível foi coletado separadamente e acondicionado em embalagens plásticas. Em seguida foram tomadas 2 medidas nas laterais da amostra, referentes à espessura da manta de material combustível. Ao final do dia era determinada a massa desse material e as informações eram registradas em formulário de campo (APÊNDICE 1). Posteriormente, era feito o acondicionamento das amostras para ser conduzido ao laboratório.

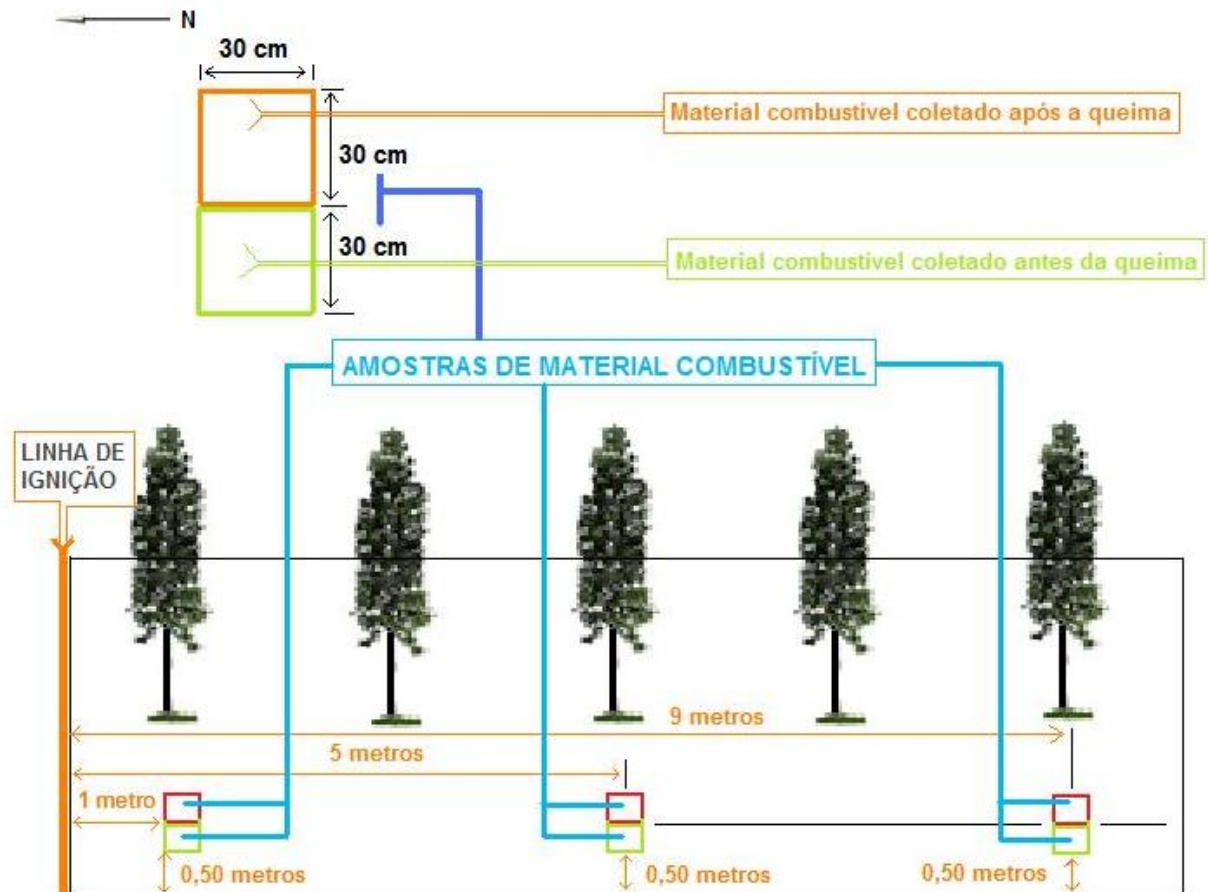


FIGURA 11 - Representação esquemática de localização das amostras de material combustível em uma parcela

Fonte: o autor (2015)

Considerando que o arranjo e características da serapilheira “material combustível” apresentam significante relevância nos aspectos relacionados ao comportamento do fogo, a coleta das subamostras de material combustível da “Classe L” foi dividida em 3 subclasses, adotando a classificação proposta por Trevisan (1992), com o objetivo de efetuar uma análise mais criteriosa e completa através da comparação de resultados.

Dessa forma, o material combustível da classe L presente em cada subamostra foi coletado de acordo com a seguinte nomenclatura:

Ln1-material solto, recém-caído, apresentando acículas de tamanho original (de 11 a 18 cm), sem avarias mecânicas, elásticas, não se quebrando ao se formar um arco quando se une o ápice à base da acícula, com fascículos em bom estado, ressequidas e pungentes ao tato.

Ln2-material solto, apresentando pouquíssima fragmentação, menor brilho e alguma variegação. Presença visível de fungos na região ventral das acículas. Ocorre alguma perda de elasticidade, notando-se que embora todas formem um arco, 20 a 30% delas se quebravam logo após terem sido submetidas ao esforço. Acículas ressequidas e pungentes ao tato.

Lv-material variando de pequenas partículas a pouca fragmentação, semelhante a Ln2, porém praticamente todas as acículas ao se tentar formar um arco se quebram instantaneamente ou logo após iniciado o esforço. As acículas apresentam achatamento e perda de elasticidade, quanto ao tato são facilmente fragmentadas. Presença abundante de pequenas raízes e hifas fúngicas e, às vezes ocorrência de raízes maiores. A maior parte do material apresenta-se fragmentado. O material dessa classe apresenta-se ainda, mais compactado e quase sempre com maiores teores de umidade quando comparado com as outras camadas. Muito embora Trevisan (1992) tenha adotado ainda as classes Lnv, Lv1, Lv2, LvFr, Fr em sua classificação, nessa pesquisa essas classes foram todas agrupadas e denominadas "Lv", pois nos aspectos relacionados a propagação e comportamento do fogo, a camada composta por essas classes é a que apresenta maiores restrições de queima e propagação do fogo.

LB litter bough, material com diâmetro de 0,71 a 2,5 cm, composto em sua grande maioria por ramos e galhos presentes em todas as camadas (FIGURA 12).

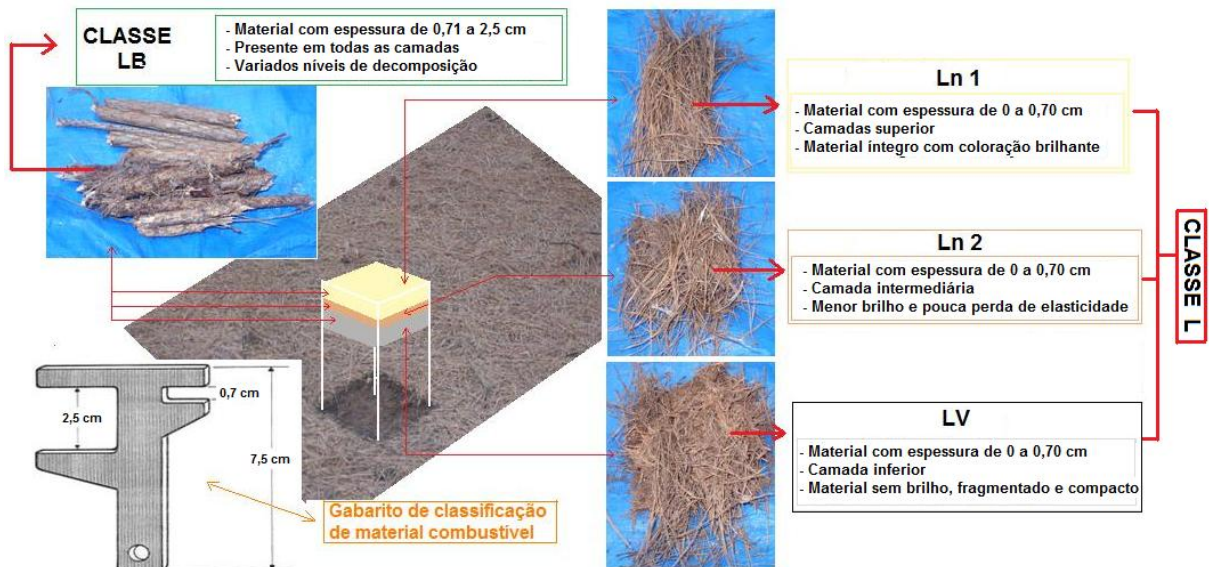


FIGURA 12 - Esquema de caracterização das camadas coletadas e que formam a manta de material combustível

Fonte: o autor (2015).

3.2.4 Queima das parcelas

A queima das parcelas era iniciada sempre a partir das 13:00 horas e se estendia geralmente até as 17:00 horas. Essa queima era realizada após a coleta de 3 amostras de material combustível e os dias de queima foram definidos em função do grau de perigo de incêndios para o dia. Foram queimadas 10 parcelas para cada grau de perigo (FIGURA 13).

Para realizar a queima das parcelas primeiramente era observada a direção do vento, uma vez que foram feitas queimas contra e a favor do vento. Posteriormente eram fixadas marcações no sentido do comprimento da parcela. Essas marcações consistiam de balizas de bambu com aproximadamente 1,30 m que eram fixadas com intervalo de 1 em 1 metro, sempre respeitando os 20 cm iniciais da linha de ignição.

Após estabelecer essa marcação eram realizadas as coletas de material combustível. Essas marcações também foram usadas como ponto de registro de informações, uma vez que à medida que o fogo avançava e passava por cada baliza, eram registradas as seguintes informações:

- a) **Variáveis meteorológicas** (temperatura, UR e velocidade do vento): para o registro dessas informações foi utilizada uma estação meteorológica portátil, modelo Kestrel 3000;
- b) **Comportamento do fogo:** Durante a queima de cada parcela foram feitas observações sobre as seguintes variáveis do comportamento do fogo, conforme procedimentos padrão adotados internacionalmente e recomendados por diversos autores (RIBEIRO, 1997; BATISTA; BEUTLING e PEREIRA, 2013):

Velocidade de propagação: obtida com auxílio de cronômetros e registrada visualmente, determinando-se o tempo necessário para a linha de fogo percorrer distâncias de 1,0 m, previamente demarcada em cada parcela, no sentido do seu comprimento (10 m);

Comprimento das chamas: obtida com o auxílio de uma régua graduada (cm) que era posicionada próximo ao fogo por um auxiliar, onde a média alcançada pelas chamas a cada metro de avanço da linha de fogo era registrada;

Intensidade do fogo: estimada pela equação proposta por Byram (1959). Numericamente, é igual ao produto da quantidade de combustível disponível, pelo seu calor de combustão e pela velocidade de propagação do fogo, como mostra a equação:

$$I = H.w.r$$

sendo:

I = intensidade do fogo em $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$

H = poder calorífico em kcal.kg^{-1} ($\pm 4000 \text{ kcal.kg}^{-1}$)

w = massa do combustível disponível em kg.m^{-2}

r = velocidade de propagação do fogo em m.s^{-1}

Altura de carbonização da casca das árvores: obtida com o auxílio de uma régua graduada (cm) que era posicionada junto aos troncos após a conclusão das queimas;

Altura de crestamento da copa: obtida com o auxílio de uma trena fixada em uma vara, o que possibilitou informações precisas da altura total e da altura de crestamento. Essas medições foram realizadas 10 dias após a

queima das parcelas e somente para o povoamento de 5 anos, uma vez que as outras áreas não foram afetadas.

Todas as informações referentes ao comportamento do fogo foram registradas em um formulário de queima (APÊNDICE 1).

Utilizou-se $H = 15490 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (poder calorífico) como valor médio para o material combustível, conforme determinações feitas por Soares e Hakkila (1987).

Após a queima das parcelas foram realizadas as coletas de 3 amostras de material residual. O material presente nessas amostras foi classificado da seguinte forma: as classes L1; L2 e Lv (correspondentes ao material fino antes da queima) foram agrupadas dentro de uma mesma classe denominada Lx e o material com espessuras de 0,71 e 2,5 cm foi denominado LBx. Na Figura 13 é demonstrado o esquema de coleta de informações de queima.

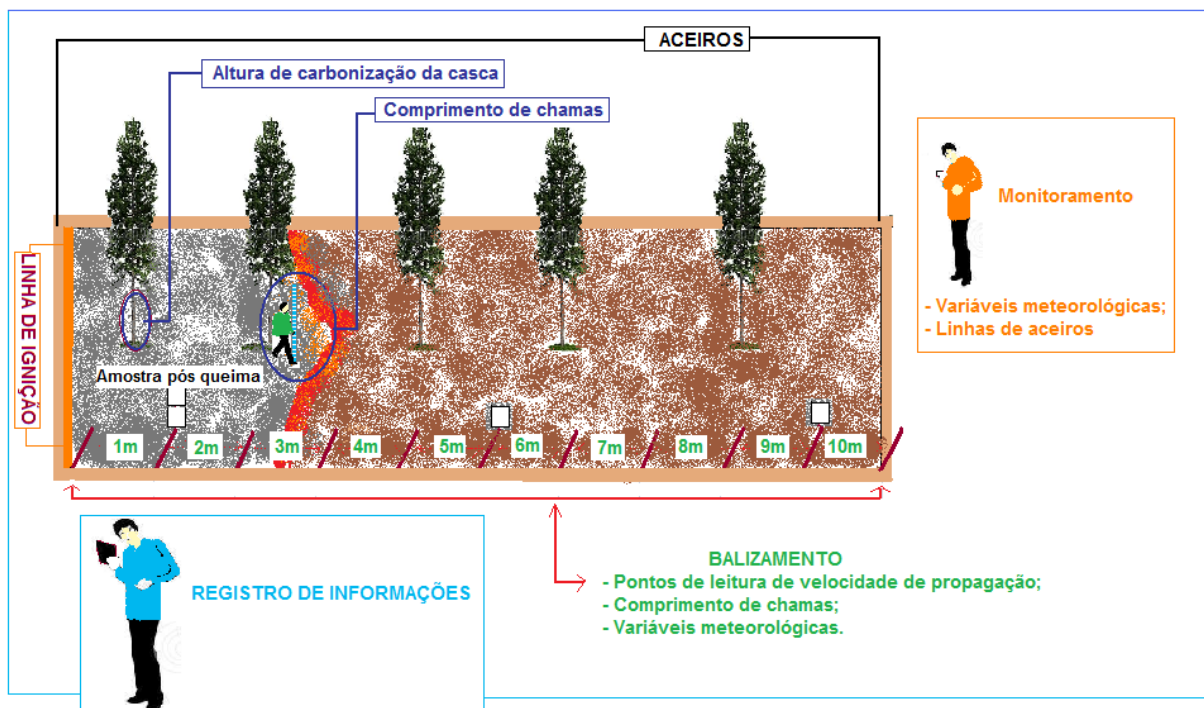


FIGURA 13 - Esquema de caracterização da queima das parcelas
Fonte: o autor (2015)

3.2.5 Atividades desenvolvidas em laboratório

Nesta etapa o material combustível, após a sua chegada ao laboratório, era transferido para embalagens de papel *kraft* e em seguida colocado em estufa a 75 °C por 72 horas.

Após a secagem foi determinada a massa desse material e os valores referentes à massa do material seco eram armazenados em formulário próprio (APÊNDICE). Em seguida essa informação era transferida para planilhas do *software Excel* e determinado o teor de umidade, com o uso da seguinte equação:

$$UMC = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100$$

Onde:

UMC = porcentagem de umidade do material combustível;

Mu = massa do material úmido (no momento da coleta);

Ms = massa do material seco (após a secagem em estufa).

Os dados referentes à queima das parcelas foram também transferidos para planilhas do *software Excel*, para posteriores análises estatísticas.

A Figura 14 apresenta os equipamentos utilizados no campo.

3.2.6 Análises estatísticas

Após concluídas as entradas de dados nas planilhas do *software Excel* foi possível construir uma matriz composta de variáveis ambientais (combustível e condições meteorológicas), e variáveis do comportamento do fogo (velocidade de propagação, altura das chamas, intensidade, carbonização da casca e crestamento da copa).

Os dados foram submetidos às análises estatísticas de variância (ANOVA), teste de comparação de médias (SNK) e análise de correlação. Para a geração dos modelos matemáticos de estimativa da velocidade de propagação, intensidade e comprimento das chamas foi utilizado o processo de *backward*, que consiste em usar todas as variáveis selecionadas inicialmente, retirando-se as de menor importância sequencialmente. Para selecionar os melhores modelos e testar a qualidade dos ajustes foram utilizados dois parâmetros de comparação:

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS EM FUNÇÃO DA FMA⁺

Os dados meteorológicos obtidos do INMET totalizaram 1461 dias, compreendendo o período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2011. (TABELA 14).

TABELA 14 - Número de observações para análises das variáveis meteorológicas para o período de 2008 a 2011 em Irati - PR

BANCO DE DADOS PARA ANÁLISE DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS		
ESTAÇÕES DO ANO	Número de dias	Porcentagem
	2008 a 2011	2008 a 2011
Primavera	359	25
Verão	356	24
Outono	371	25
Inverno	375	26
TOTAL	1461	100

Fonte: INMET (2012), elaborado pelo autor (2015)

Para a definição do período mais adequado para a instalação do experimento em campo, foi calculada a FMA⁺ com os dados do período de 2008 a 2011, que são apresentados na Figura 15, onde se pode verificar que o período de maior ocorrência dos graus de perigo alto e muito alto esteve concentrado no outono e no inverno, corroborando com Soares (1985), Soares e Santos (2002), que observaram que as ocorrências de incêndios no estado do Paraná estendem-se de julho a setembro. Vosgerau *et al.* (2006), ao analisar a base de dados do corpo de bombeiros do estado do Paraná, também observaram uma maior incidência das ocorrências de incêndios nesse mesmo período, devido as médias mais baixas de precipitação e de umidade relativa do ar, o que contribui significativamente para o aumento da estatística de ocorrências dos incêndios. Ferreira, Tetto e Batista (2011) descrevem a região norte do Paraná como a região que apresenta os maiores problemas com incêndios florestais, apresentado 38,5 % de ocorrências em 2011 também no período de julho a setembro.

Diante deste cenário, ponderando ser mais proveitoso avaliar o comportamento do fogo no momento mais crítico do ano, definiu-se que a implantação do experimento em campo deveria ser executada em algum período compreendido entre o outono e o inverno de 2012. Ribeiro (1997) expõe que as estações do ano apresentam regime diferenciado de chuva, temperatura e umidade relativa do ar, que por sua vez interagem com o material combustível e consequentemente com o comportamento do fogo.

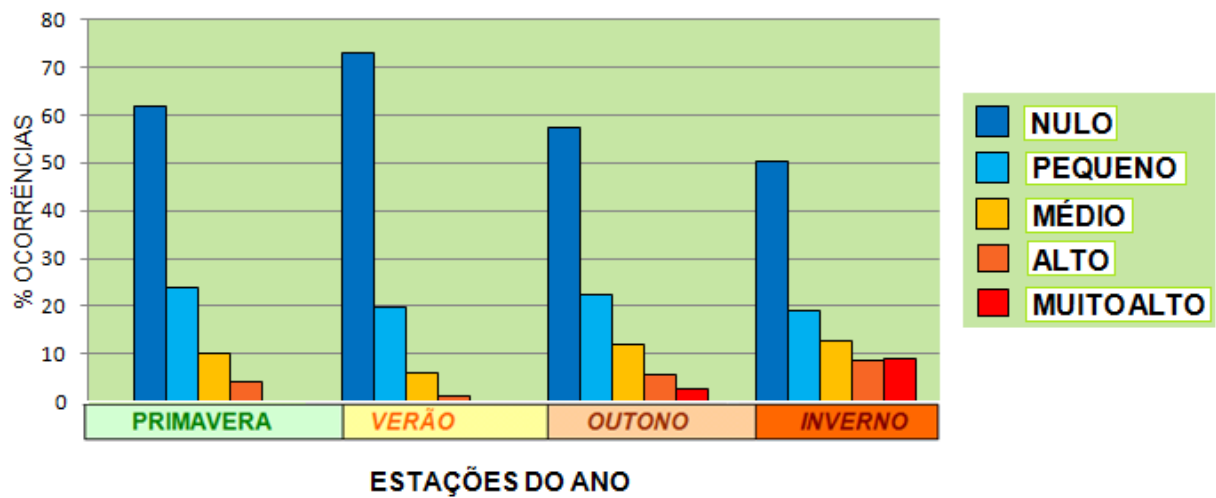


FIGURA 15 - Comportamento da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺) no período de 2008 a 2011 para Irati – PR
Fonte: o autor (2015)

Considerando que todo o trabalho de campo foi planejado e executado em função dos graus de perigo de incêndios da (FMA⁺), as Figuras 16, 17 e 18 demonstram a distribuição dos graus de perigo (FMA⁺) para o período de 2008 a 2011 em comparação com o ano da instalação do experimento (2012).

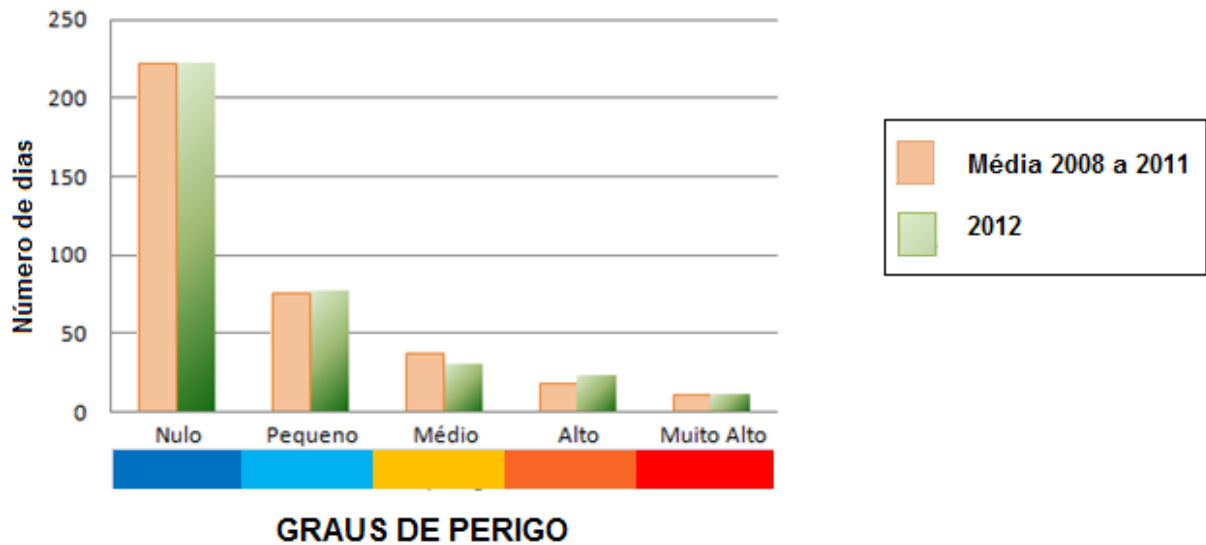


FIGURA 16 - Distribuição dos graus de perigo FMA⁺ para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para Irati - PR

Fonte: o autor (2015)

Na Figura 17 pode ser observada a distribuição dos graus de perigo para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012, onde se constata uma maior concentração dos graus de perigo alto e muito alto nas estações do outono e do inverno.

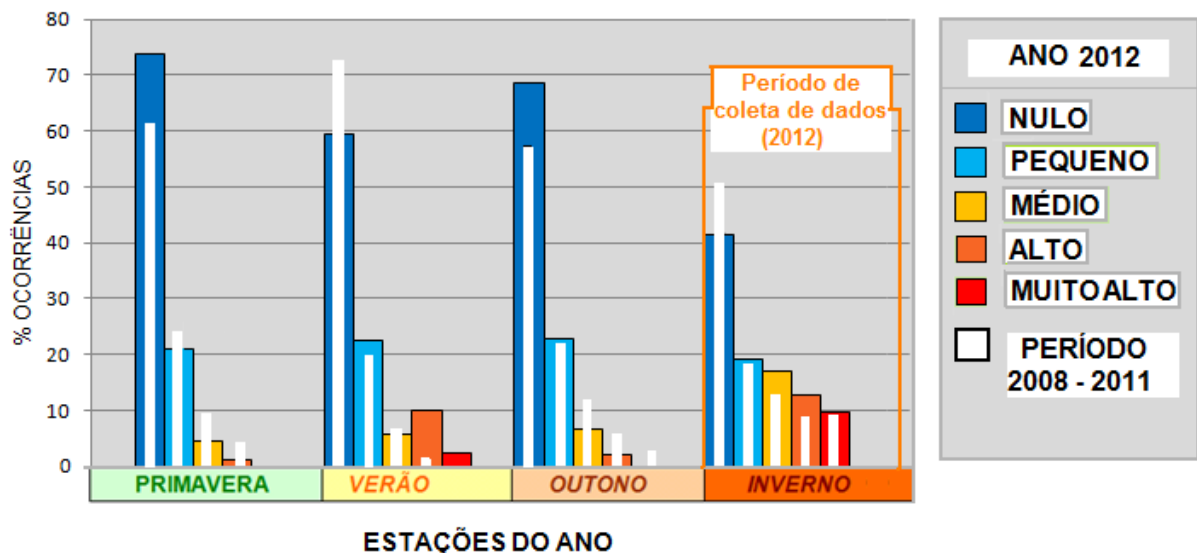


FIGURA 17 – Distribuição dos graus de perigo FMA⁺ por estação do ano para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para a região de Irati – PR

Fonte: o autor (2015)

A Figura 18 apresenta a distribuição dos graus de perigo ao longo dos dias de coleta de dados, correspondente ao período de 24/08/2012 a 21/09/2012.

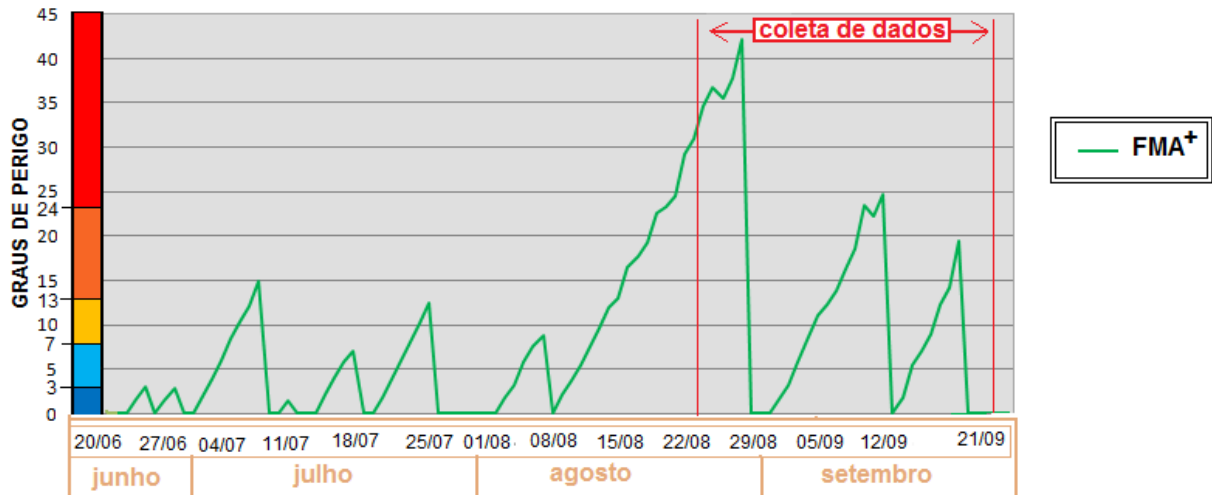


FIGURA 18 – Comportamento da FMA⁺ para os meses de julho a setembro de 2012 indicando o período de coleta de dados

Fonte: o autor (2015)

A Tabela 15 apresenta os valores médios das variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) e dos parâmetros do comportamento do fogo (velocidade de propagação e comprimento de chamas) observados durante as queimas, para cada grau de perigo. As variáveis meteorológicas medidas no campo apresentaram pouca variação quando comparadas com os dados do INMET, com exceção da velocidade do vento, que variou de 0,00 a 0,43 m.s⁻¹ no campo e 2,30 a 0,60 m.s⁻¹ na estação. A temperatura no campo variou de 27,4 °C (grau de perigo muito alto) a 22 °C (grau de perigo pequeno). As queimas realizadas contra o vento apresentaram menores velocidades de propagação do fogo, quando comparadas com as queimas à favor do vento. As maiores velocidades de propagação registradas ocorreram no povoamento de 5 anos para o grau de perigo muito alto e variaram de 0,037 m.s⁻¹ (a favor do vento) a 0,0160 m.s⁻¹ (contra o vento). De acordo com a classificação de velocidade de propagação descrita por Botelho e Ventura (1990) observou-se velocidade média para o povoamento de 5 anos e velocidade lenta nos cultivos de 8 e 11 anos. A Figura 19 apresenta um panorama geral do comportamento do fogo observado durante as queimas prescritas em cada grau de perigo da FMA⁺.

TABELA 15 - Médias das variáveis meteorológicas e das variáveis do comportamento do fogo observadas em função dos graus FMA⁺

GRAUS DE PERIGO	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS						COMPORTAMENTO DO FOGO														
	DADOS CAMPO			DADOS INMET			VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m/s)						Consumo de material combustível kg/m ²			ESPESSURA DA MANTA (cm)					
	Temperatura (°C)	Veloc. Vento (m/s)	UR (%)	Temperatura (°C)	Veloc. Vento (m/s)	UR (%) 13:00 horas	Contra o vento			À favor do vento			Classes Ln1, Ln2 e Lv			Antes da Queima			Depois da Queima		
							IDADE (Anos)			IDADE (Anos)			IDADE (Anos)			Idade (anos)			Idade (anos)		
							5	8	11	5	8	11	5	8	11	5	8	11	5	8	11
Muito alto	27,4	0,43	46,1	24,2	1,7	55,6	0,0160	0,0046	0,0029	0,0317	0,0097	0,0061	0,5988	0,5930	0,6959	8,8	6,8	7,1	1,0	2,3	3,8
Alto	23,8	0,33	53,7	28,1	1,8	47,6	0,0118	0,0040	0,0036	0,0165	0,0083	0,0053	0,5218	0,6578	0,3270	3,7	5,9	7,7	0,4	1,4	3,9
Médio	25,2	0,43	54,9	23,5	2,3	53,6	0,0059	0,0063	0,0039	0,0098	0,0053	0,0046	0,3281	0,4213	0,0309	3,6	6,6	6,5	2,3	4,9	4,8
Pequeno	22,0	0,21	54,1	24,1	0,8	52,3	0,0044	----	0,0040	----	----	0,0047	0,1262	----	0,2541	3,6	6,0	7,7	3,2	6,0	6,0
Nulo	23,4	0,00	87,5	19,4	0,6	63,0	----	----	----	----	----	----	----	----	----	7,3	5,9	6,5	7,3	5,9	6,5

Fonte: o autor (2015)

GRAUS DE PERIGO DE INCÊNDIOS DA FMA⁺



FIGURA 19 – Aspectos do comportamento do fogo em função dos graus de perigo da FMA⁺
Fonte: o autor (2015)

4.1.1 Precipitação pluviométrica

A precipitação pluviométrica é a variável meteorológica mais fortemente relacionada com as características da combustão (ignição, propagação e intensidade do fogo) dos materiais combustíveis mortos. No entanto, as análises da precipitação se mostraram bastante complexas para a região.

De acordo com Nunes (2005) a utilização de dados meteorológicos e climatológicos precisos é fundamental para o planejamento de prevenção e combate aos incêndios florestais, onde os benefícios resultantes das análises dos registros meteorológicos são extremamente amplos, sendo, entre outros, balizas mestras para o planejamento e execução de queimas controladas. Nesse sentido, a Figura 20 apresenta a distribuição anual da precipitação para a região pesquisada, onde pode ser observado que durante o ano de 2012 choveu abaixo do volume observado nos anos anteriores, bem como, abaixo da média dos últimos 4 anos.

Segundo o IAPAR (2014), a precipitação histórica para o local do estudo, delimitada pelas isoietas, situa-se entre 1600 e 1800 mm anualmente, indicando que no ano de 2012, muito embora tenha ocorrido precipitação abaixo da média para os últimos 4 anos, com um volume acumulado de 1642,1 mm, ficou dentro do limite mínimo definido pelo instituto.

Segundo Nimer (1979), Baldo, Martins e Nery, (2001), o comportamento oscilante da precipitação para o período do outono e do inverno verificado na região pode ser atribuído a anomalias associadas a fenômenos de circulação da atmosfera. Aldaz (1971) descreve que a dinâmica da atmosfera superior exerce um predomínio sobre o regime de chuvas, muito embora o relevo e a insolação sejam também importantes fatores adicionais. Nimer (1979) complementa descrevendo que tanto os índices pluviométricos (acumulado anual) como a existência ou não de uma estação seca ou subseca fundamenta-se em normais climatológicas, representando, portanto, valores e condições médias de um longo período de sucessivos anos, não devendo ser interpretado como uma realidade de cada ano.



FIGURA 20 - Precipitação pluviométrica anual para a região de Irati - PR
 Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

A Figura 21 demonstra que a “média” acumulada mensal de precipitação (período 2008 a 2011) para a região do estudo foi uniformemente distribuída ao longo de todo o ano, indicando não haver ocorrência de estiagem na região. No entanto, no ano de 2012 verifica-se a ocorrência de estiagem entre os meses de julho, agosto e setembro, corroborando com Soares (1985), Soares e Santos (2002), Vosgerau *et al.* (2006) e Ferreira, Tetto e Batista (2011).

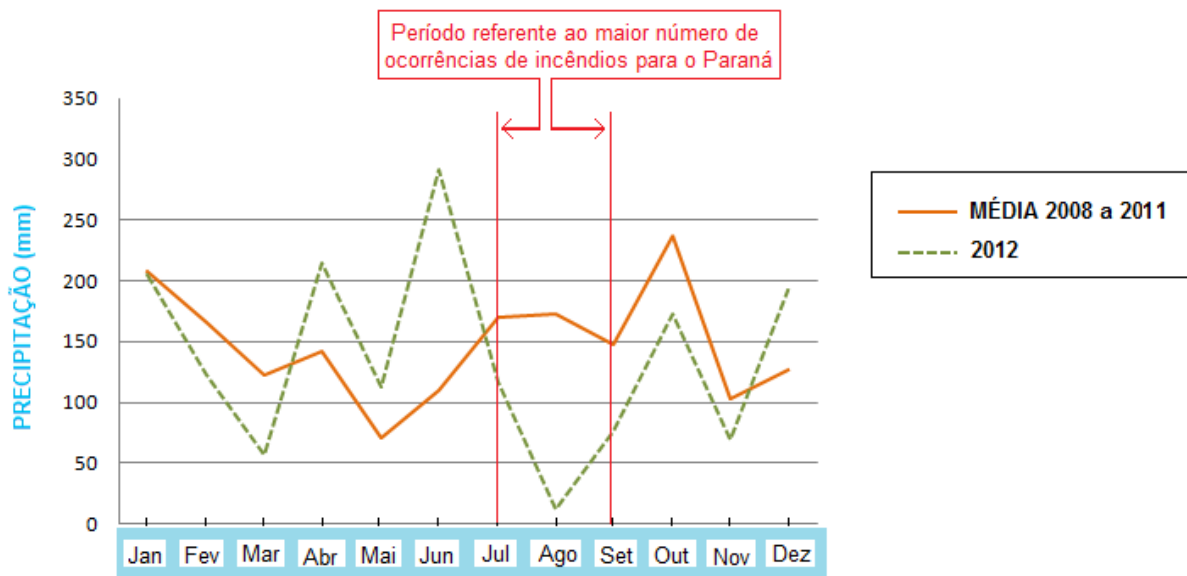


FIGURA 21 – Precipitação pluviométrica acumulada mensal para o período de 2008 a 2011 e para o ano de 2012 para Irati -PR (em evidência o período com maiores registros de incêndios para o estado do Paraná)
 Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

A Figura 22 apresenta a distribuição das chuvas acumuladas por estação do ano, para os anos de 2008 a 2012, evidenciando o período de coleta de dados que ocorreu no inverno de 2012. Verifica-se que normalmente as estações da primavera e do verão apresentam certa regularidade ao longo dos anos. Entretanto, os valores acumulados de precipitação para o outono e o inverno oscilaram muito ao longo dos anos avaliados. Os anos de 2008, 2010 e 2012 apresentaram no outono precipitação semelhante à registrada para a primavera e verão dos respectivos anos, sendo que em 2012 as chuvas no outono apresentaram valores semelhantes aos observados na primavera e verão. Quando se observam os anos de 2008, 2010 e 2012, que apresentaram precipitação semelhante nas estações da primavera, verão e outono, verifica-se que os registros do inverno foram bem inferiores, sendo nestes casos, o inverno o período mais seco para os referidos anos. No entanto, quando se observam os anos de 2009 e 2011, verifica-se uma inversão de posições e nesse caso o inverno apresentou níveis de precipitação semelhantes aos observados na primavera e no verão. Portanto observa-se, que nesses anos seria impossível implantar o experimento no inverno, devido o volume de precipitação, muito embora o experimento pudesse ter sido executado no outono.

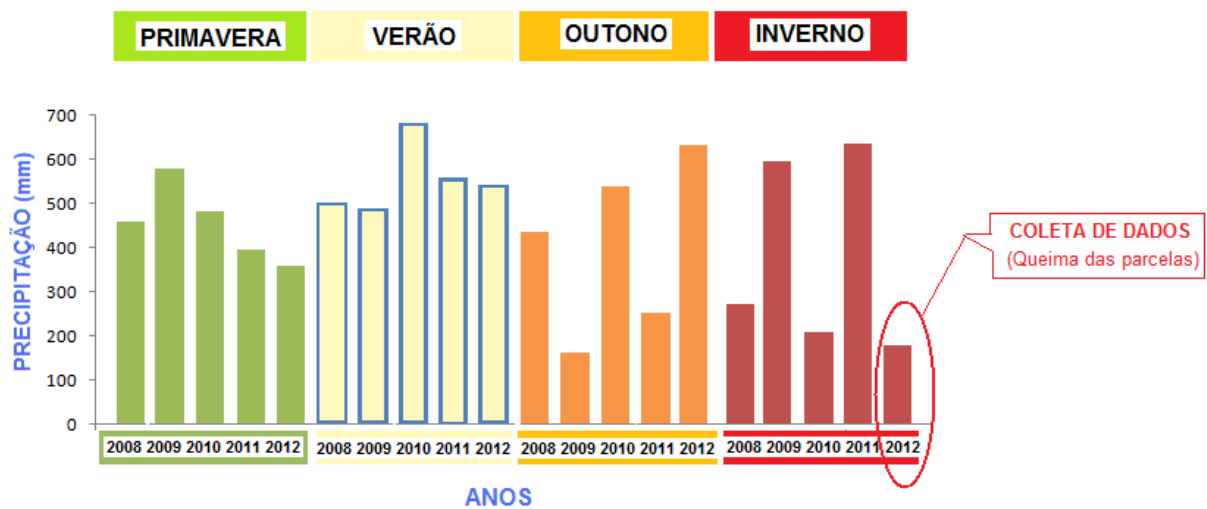


FIGURA 22 – Precipitação pluviométrica anual por estação do ano para os anos de 2008 a 2012 para Irati - PR

Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

Segundo o IAPAR (2014), o estado do Paraná apresenta um trimestre mais seco, correspondente aos meses de junho, julho e agosto, com precipitação acumulada esperada para a região do estudo entre 250 e 350 mm. Considerando que esse período compreende parte do outono e parte do inverno, o gráfico

apresentado na Figura 23 permite uma análise comparativa, situando a pesquisa dentro desse contexto. Observa-se ainda, que a precipitação nos anos de 2008 e 2010, ficou dentro do padrão histórico (IAPAR, 2014). Já no ano de 2011 choveu mais do que o dobro do volume esperado para o período. No ano de 2012 o volume acumulado ficou um pouco acima da média histórica.

Segundo Nimer (1979), a distribuição anual das chuvas no Paraná se faz, geralmente, de forma bastante uniforme. No entanto, ressalta a impossibilidade de se determinar a época de incidência das precipitações máximas e mínimas, considerando que se pode, entretanto conhecer sua tendência mais ou menos definida. Nesse estado o máximo pluviométrico se dá no verão e o mínimo ocorre em fins de outono ou no inverno (nas regiões centro-oeste e sudeste), e o trimestre mais chuvoso é na maioria das vezes representado por novembro, dezembro e janeiro.

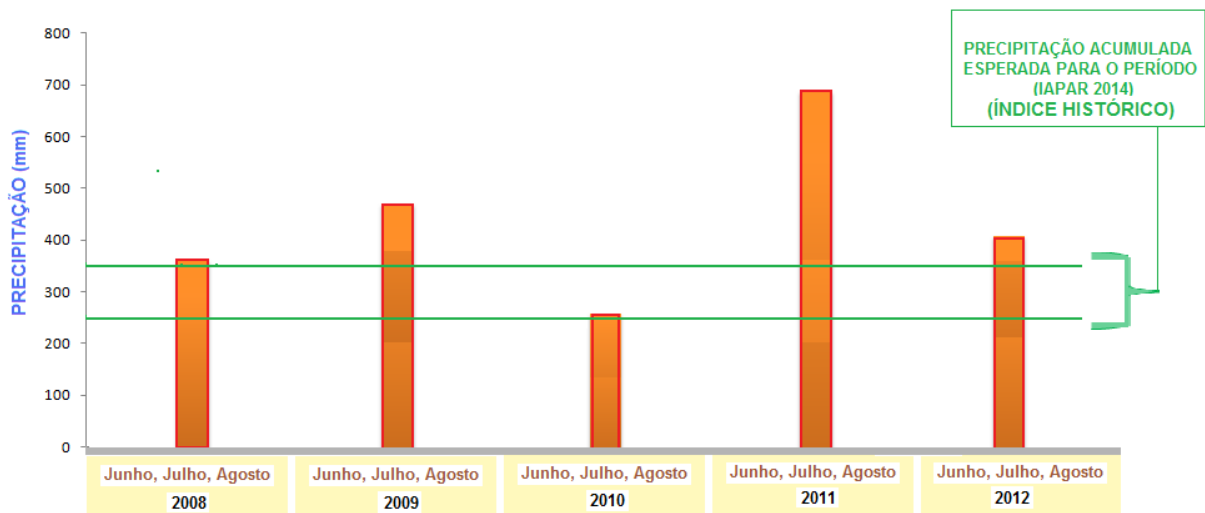


FIGURA 23 – Precipitação acumulada para os meses de junho, julho e agosto nos anos 2008, 2009, 2010, 2011 e 2012 e os índices históricos para o período correspondente para a região de Irati - PR

Fonte: IAPAR (2014) elaborado pelo autor (2015)

Analisando-se o comportamento da precipitação para a região sudeste do Paraná pode-se observar que o período compreendido pelo outono e inverno geralmente apresenta índices de precipitação um pouco inferiores quando comparadas com o período da primavera e verão. Nesse sentido, a precipitação acumulada no período do outono-inverno, pode apresentar oscilação, às vezes ocorrendo no início do outono e seguindo-se de uma pequena estiagem no período

do inverno e às vezes ocorrendo o inverso, como um outono mais seco e a precipitação ocorrendo de forma mais concentrada no inverno.

A Figura 24 demonstra que no outono de 2012 ocorreram chuvas regulares, com volumes expressivos, porém esse volume foi reduzindo durante o início do inverno, com a ocorrência de uma pequena estiagem durante o mês de agosto até o dia 21 de setembro (início da primavera). A Figura 25 evidencia que esse período de estiagem iniciou no dia 07 de agosto e se estendeu até o dia 20 de setembro. As atividades de campo (queima das parcelas) foram iniciadas no dia 24 de agosto e se estenderam até o dia 21 de setembro.

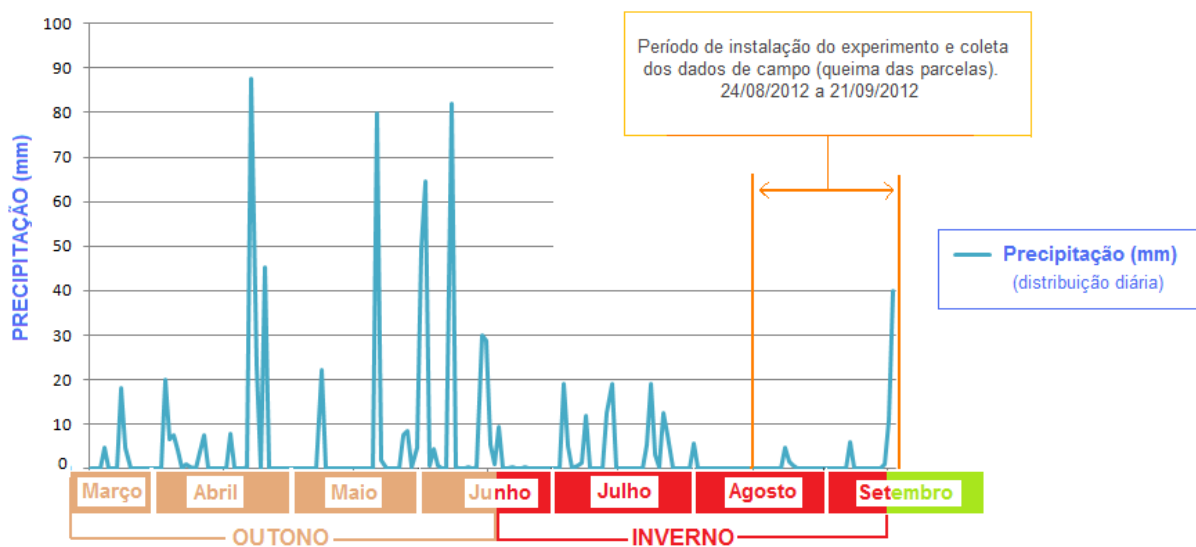


FIGURA 24 – Precipitação para o período outono – inverno do ano de 2012 para Irati - PR
 Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

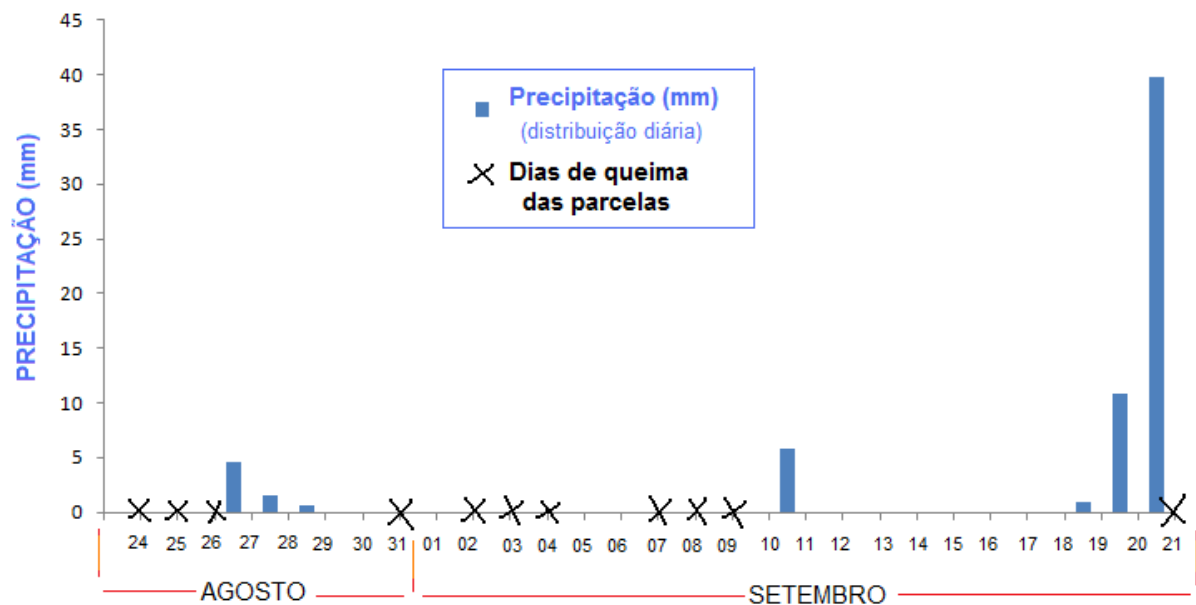


FIGURA 25 – Precipitação diária para o período de coleta de dados em Irati - PR
 Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

4.1.2 Temperatura

A Figura 26 apresenta as médias mensais da temperatura para o período de 2008 a 2011 e as médias para o ano de 2012, evidenciando que o ano de instalação do experimento esteve dentro das médias. Segundo Schroeder e Buck (1970), a temperatura do ar afeta a temperatura do material combustível, que por sua vez, é um dos fatores determinantes para o início e propagação do fogo. Soares (1985) complementa ao descrever que o total de energia calorífica necessária para evaporar a água do material combustível e aumentar a sua temperatura, para que este entre em ignição, está diretamente relacionado com a temperatura inicial do material combustível e a temperatura do ar.

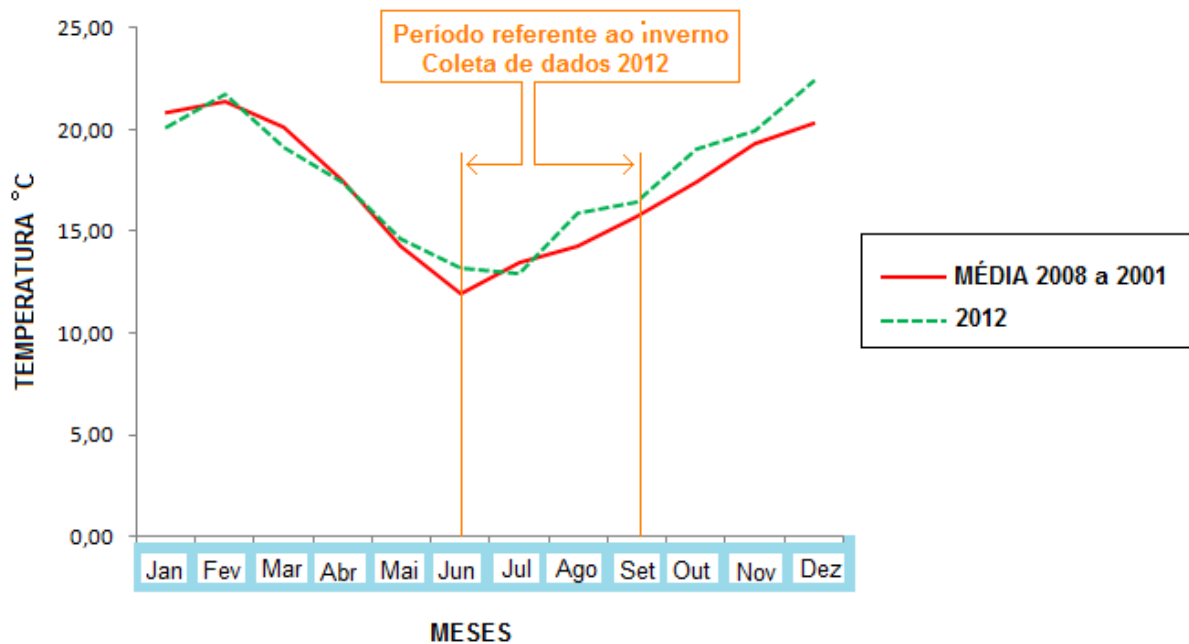


FIGURA 26 – Temperatura média mensal de Irati - PR no período de 2008 a 2011 e médias mensais do ano de 2012

Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

De acordo com a Figura 27, podem ser observadas as diferenças de temperatura verificadas no campo, durante a queima das parcelas, quando comparadas com as temperaturas da estação meteorológica. De maneira geral, a temperatura variou de 19,9 a 30,11 °C no campo e 19,6 a 30,2 °C na estação meteorológica do INMET.

Segundo Soares e Batista (2007), a temperatura do ar pode variar consideravelmente em função do tipo de cobertura do solo, da proximidade de edifícios ou árvores, do relevo e também da altura em relação ao solo. A relação da temperatura com o comportamento do fogo, segundo Soares (1985), tem influência fundamental no processo de ignição, no entanto, após a ignição o seu efeito sobre a combustão subsequente é bastante reduzido.

De maneira geral as análises de variância desenvolvidas em função das variáveis meteorológicas e dos graus de perigo de incêndios apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, considerando que o índice FMA⁺ é calculado em função dessas variáveis, pode-se dizer que o índice apresenta bom ajuste com essas variáveis e conseqüentemente apresenta condições de reproduzir diferentes padrões de comportamento do fogo. Nesse sentido, a análise de variância multifatorial para a temperatura do ar (APÊNDICE 3), atribui diferença significativa ao nível de 95% de significância, em função dos graus de perigo de incêndios. Tendo sido detectada diferença estatística entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao cálculo de comparação de médias, SNK (*Student-Newman-Keuls*) para as idades onde se constata que o povoamento de 5 anos é heterogêneo, quando comparado com os povoamentos de 8 e 11 anos. O teste SNK apresenta as diferenças observadas em função dos graus de perigo (APÊNDICE 3).

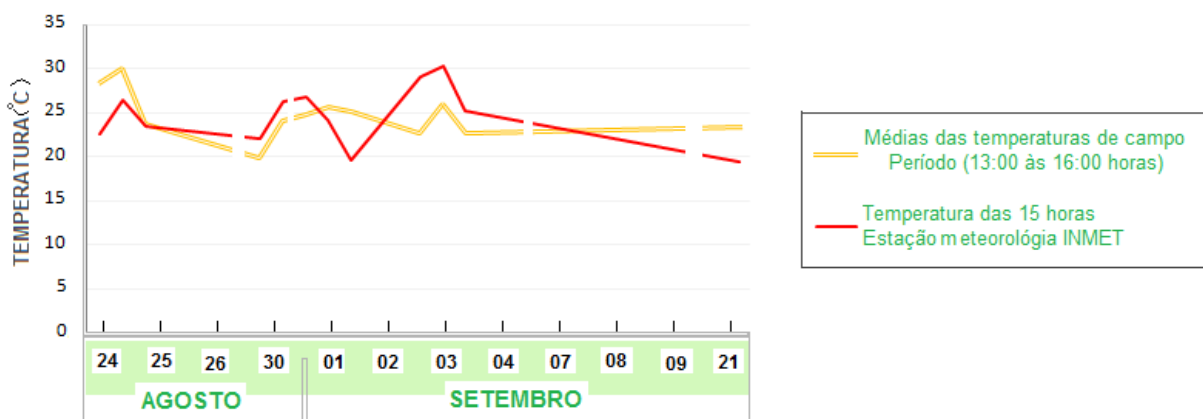


FIGURA 27 – Temperaturas diárias (dados de campo) e temperatura das 15:00 horas da estação meteorológica do INMET para Irati - PR
Fonte: o autor (2015)

4.1.3 Velocidade do vento

Dentre as variáveis meteorológicas que irão afetar os incêndios florestais, o vento é o de maior dificuldade de medição por ser bastante variável. Apesar de sua

imprevisibilidade, o seu conhecimento afeta diretamente a taxa de combustão e de propagação. Além disso, é responsável pelo arrastamento de faíscas que poderão provocar focos secundários e exerce papel fundamental em incêndios de copa, por transportar o calor e as chamas de árvore para árvore (DAVIS, 1959; SOARES, 1985; SOARES, BATISTA, 2007). A Figura 28 apresenta as médias mensais de velocidade do vento para a região, onde verifica-se que a partir de agosto os ventos sopram com maior intensidade até o final de dezembro. De maneira geral, as velocidades médias mensais para o ano de 2012 não apresentaram variação significativa em relação ao período histórico.

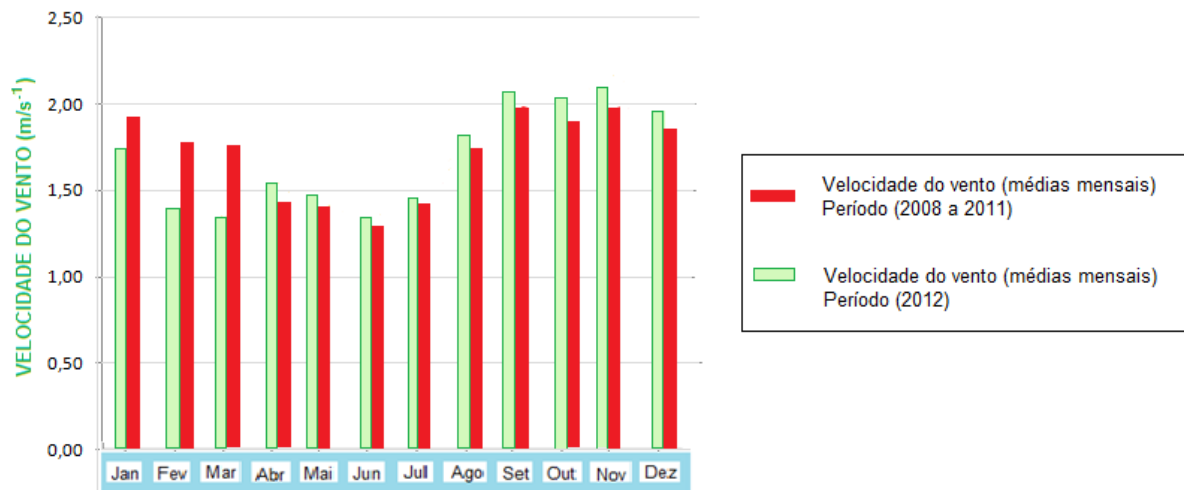


FIGURA 28 – Médias mensais da velocidade do vento para o período 2008 a 2011 e para o ano de 2012 em Irati - PR
Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

A Figura 29 demonstra que as velocidades do vento obtidas no campo apresentaram variação, quando comparadas com os valores do INMET. Isso se deve em função da altura onde essa velocidade foi obtida na estação meteorológica (6 metros). No campo as tomadas de velocidade do vento foram obtidas a uma altura de aproximadamente 1 metro.

Gould *et al.* (2007) citam que para determinar valores confiáveis de velocidade do vento é necessário que seja conhecida a variação do vento dentro e fora da floresta, com a utilização de mais de um anemômetro, com medições em pequenos intervalos de tempo (entre 1 a 20 minutos).

Segundo Brown e Davis (1973) o aumento da velocidade do vento causa aumento na velocidade de propagação do fogo e, conseqüentemente, incêndios mais perigosos. No entanto, a altura das chamas não necessariamente aumenta com uma maior velocidade do vento devido ao fato de que ventos muito fortes fazem as chamas assumirem uma posição com um ângulo mais agudo e de menor inclinação, explicando parcialmente a não ocorrência de fogo na copa das árvores durante fortes ventos. Fernandes (2009) afirma existir uma relação direta entre o comprimento das chamas, a velocidade do vento e velocidade de propagação do fogo.

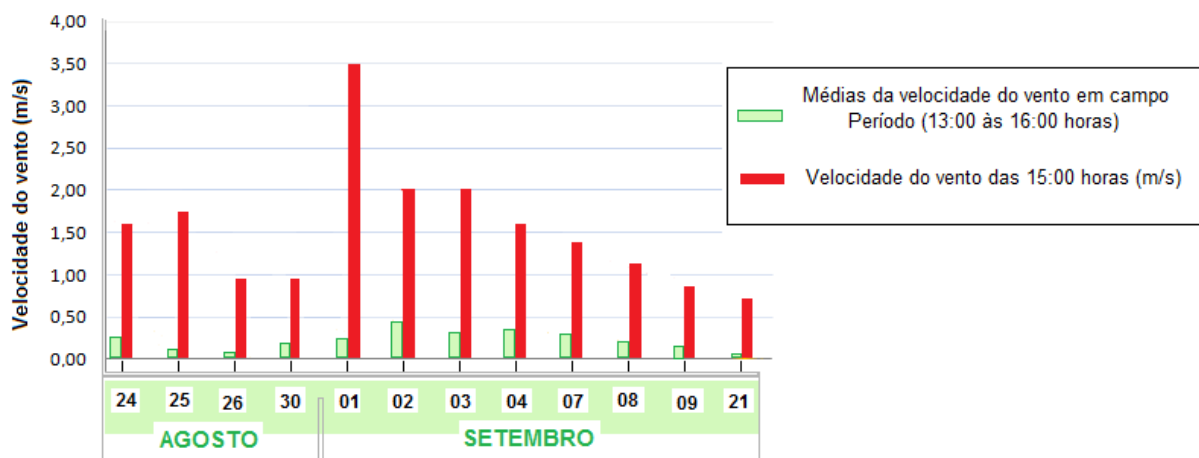


FIGURA 29 – Velocidade do vento nos dias de coleta de dados (médias de campo) e dados de velocidade do vento das 15:00 horas para Irati - PR
Fonte: INMET (2013), elaborado pelo autor (2015)

A análise de variância multifatorial para a velocidade do vento (APÊNDICE 4) atribui diferença significativa ao nível de 95% de significância, em função dos graus de perigo de incêndios. O teste SNK foi calculado para os graus de perigo, onde foram verificadas diferenças entre os graus nulo e pequeno, quando comparados com os graus médios, alto e muito alto.

4.1.4 Umidade relativa do ar

Em função da constante troca de água entre a atmosfera e os materiais combustíveis mortos, a umidade atmosférica exerce efeito direto na inflamabilidade dos combustíveis florestais e no comportamento do fogo. O material, quando seco

absorve água de uma atmosfera úmida, já quando o material está mais úmido que o ar, acaba perdendo água, sendo a quantidade de umidade que o material morto pode absorver do ar e reter, depende basicamente, da umidade relativa do ar (SCHROEDER e BUCK, 1970). De acordo com a Figura 30, pode-se verificar que a umidade relativa do ar observada no campo apresentou pouca variação com a umidade relativa do ar da estação meteorológica. A umidade relativa do ar das 15:00 horas ajustada para às 13:00 horas de acordo com a equação descrita por Nunes (2005), também pode ser verificada a seguir.



FIGURA 30 – Comparação da umidade relativa do ar nos dias de coleta, da estação às 15:00 horas e estimada às 13:00 horas em Irati - PR

Fonte: o autor (2015)

A análise de variância multifatorial para a umidade relativa do ar (APÊNDICE 5) atribui diferença significativa ao nível de 95% de significância, em função dos graus de perigo de incêndios. O teste SNK foi calculado para os graus de perigo, onde foram verificados que os graus de perigo nulo, pequeno, médio, alto e muito alto apresentaram-se heterogêneos em função da umidade relativa do ar.

4.2 MATERIAL COMBUSTÍVEL

A Figura 31 apresenta as variações de espessura da manta de material combustível observadas na área do estudo. O povoamento de 5 anos apresentou maior variação quando comparado com as áreas de 8 e 11 anos. Essa variação se

deve ao arranjo e a presença de vegetação de gramíneas ou capoeira nesta área, uma vez que as condições do povoamento ainda permitem uma maior insolação, pelo fato das árvores serem jovens. Os povoamentos de 8 e 11 anos apresentaram o material já acamado, sendo o povoamento de 11 anos o que apresentou as maiores espessuras da manta de combustível. Essas constatações são validadas por Souza, Soares e Batista (2003) ao descreverem que em povoamentos de *Pinus taeda* ocorre um aumento gradativo da manta de combustível até os 17 anos de idade. De acordo com Trevisan (1992), a espessura dos horizontes orgânicos sob povoamentos de *Pinus taeda* é influenciada pela qualidade do sítio, onde a espessura depende da deposição de material proveniente das plantas, da atividade dos organismos decompositores e ainda do desenvolvimento de raízes nesse material. As espessuras médias observadas ficaram entre 4 e 5 cm para as áreas de 5 anos, 6 cm para a área de 8 anos e entre 7 e 8 cm para a área de 11 anos. Trevisan (1992) observou espessuras de 8, 13 e 12 cm para sítios bom, médio e ruim, respectivamente, ao desenvolver estudos em povoamentos de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade, na região de Ponta Grossa (PR). Pereira (2009) observou espessuras de 14,8 a 15,3 cm em povoamentos de *Pinus elliottii* e Batista (1995) observou uma espessura média da manta morta de 5,3 cm em povoamentos de *Pinus taeda* no norte do Paraná.

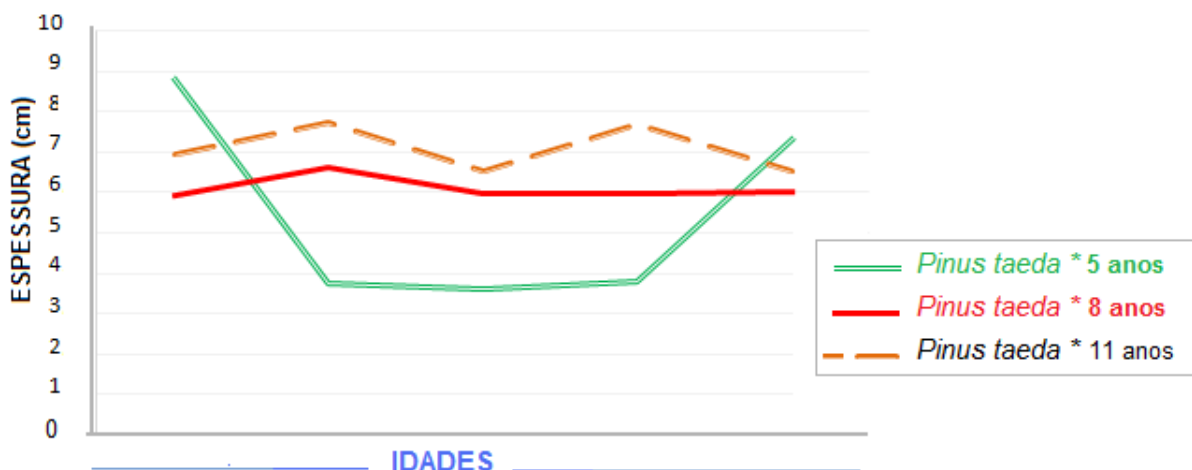


FIGURA 31 – Variação da espessura da manta de material combustível em função da idade
Fonte: o autor (2015)

A Figura 32 apresenta a carga de material combustível em função das idades, classes de decomposição e classe diamétrica, onde se verifica que a quantidade de material presente na classe Ln1 (material superficial) valores de 0,21 a 0,38 kg.m⁻²; o material intermediário composto pela classe Ln2 não foi encontrado na área de 5 anos e para as áreas de 8 e 11 anos os valores ficaram entre 0,22 a 0,36 kg.m⁻²; a classe Lv (material degradado) apresentou maior variação entre as áreas, com valores médios de 0,40; 0,43 e 0,76 kg.m⁻² para as áreas de 5, 8 e 11 anos, respectivamente.

A carga total de material combustível apresentou valores médios de 8,8; 10,1 e 15,7 ton.ha⁻¹ para as áreas de 5, 8 e 11 anos, respectivamente. Batista (1995) encontrou valor médio de 10,31 ton.ha⁻¹; Souza (2000) obteve quantidades de 6,07; 8,1; 11,39 e 13,7 ton.ha⁻¹ para povoamentos com idades de 5, 7, 9 e 11 anos, respectivamente; Pereira 2009 observou valores muito superiores, entre 31,85 a 42,66 ton.ha⁻¹, em povoamentos de *Pinus elliottii*.

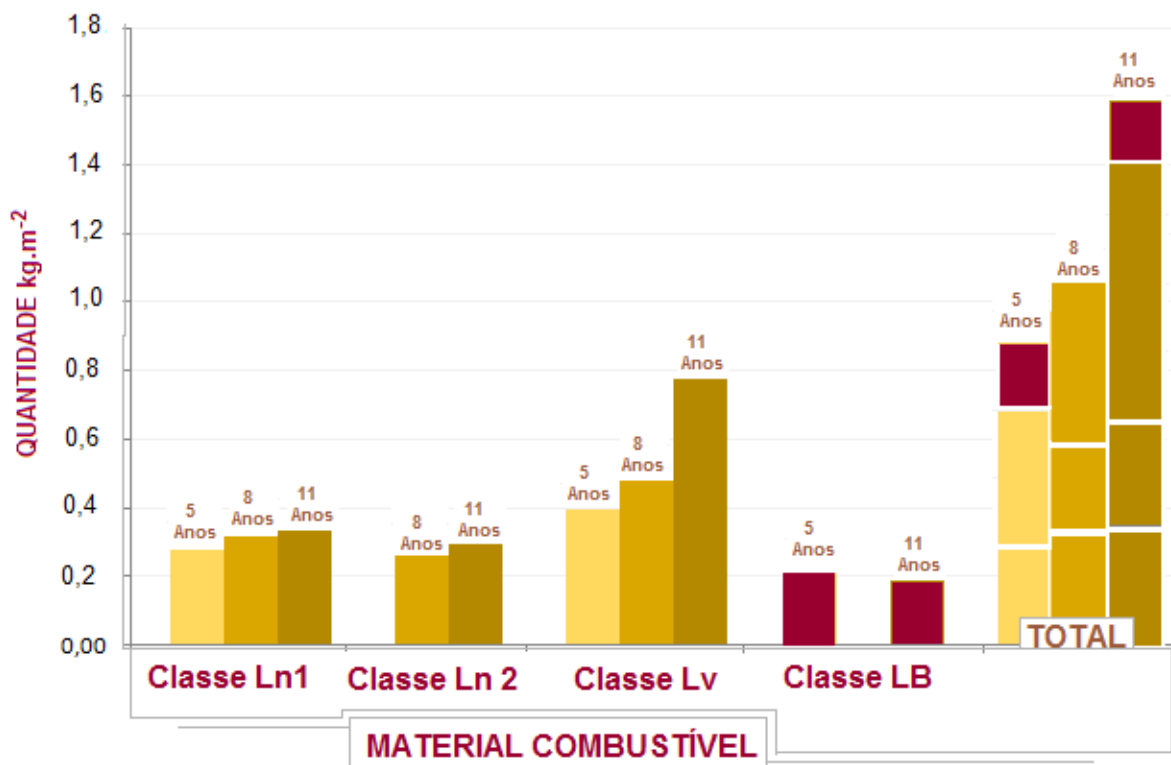


FIGURA 32 - Quantidade de material combustível (kg.m⁻²) em função da idade por grau de decomposição e classe diamétrica

Fonte: o autor (2015)

A Figura 33 apresenta um ajuste de função para as classes de material fino, correspondente as classes Ln1, Ln2 e Lv onde foram obtidos R^2 de 0,99; 0,93 e 0,80 para as idades de 5, 8 e 11 anos, respectivamente.

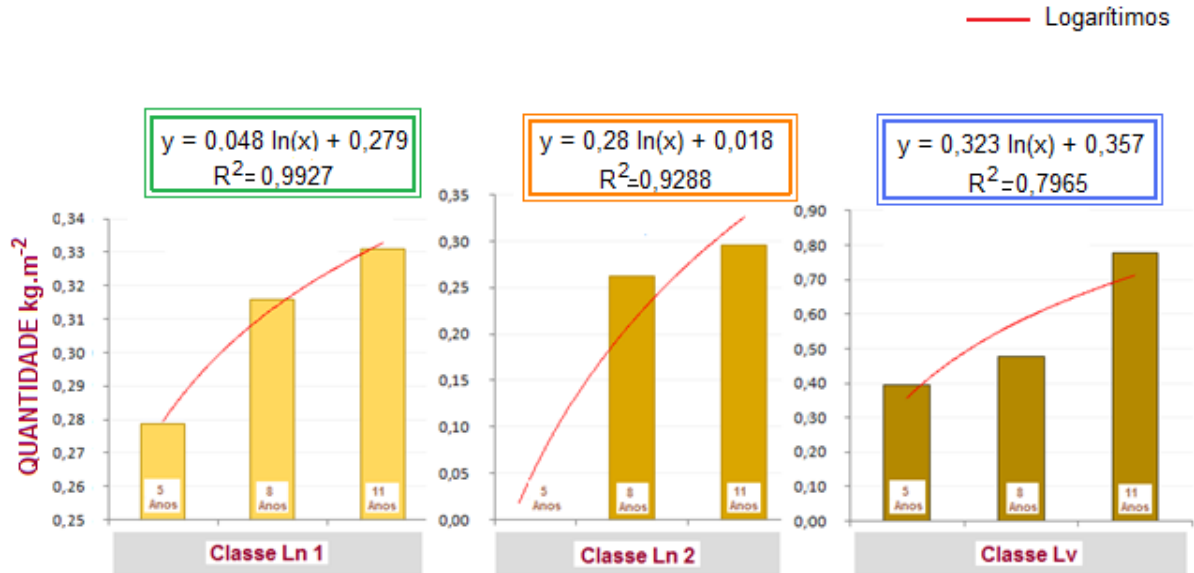


FIGURA 33 - Ajuste de funções logarítmicas para a carga de material combustível fino para as diferentes idades

Fonte: o autor (2015)

4.2.1 Eficiência da queima em função dos graus de perigo da FMA⁺

A Figura 34 apresenta as variações da espessura da manta observadas antes e após a queima, em função dos graus de perigo, onde constatou-se uma redução gradativa da espessura da manta em função dos graus de perigo. Considerando que mais de 80% da manta é composta por material fino, Soares e Batista (2007) ressaltam que na determinação da quantidade de material combustível em uma floresta, deve-se separar a quantidade total da quantidade disponível. A quantidade de material combustível disponível depende particularmente da proporção de material vivo e morto, do tamanho das partículas, do conteúdo de umidade e da sua continuidade. Dessa forma, a Figura 35 evidencia que no grau de perigo muito alto a quantidade de combustível disponível foi superior quando comparada com o grau nulo. De acordo com Brown (1981), a quantidade disponível pode variar significativamente, sendo que a sua estimativa constitui um dos principais passos

para a avaliação do comportamento do fogo, delineamento de planos de prevenção e controle e realização de queimas controladas. Dessa forma a FMA⁺ é uma ferramenta que apresenta condições de ser utilizada para as práticas de queima controlada em cultivos de *Pinus taeda*.

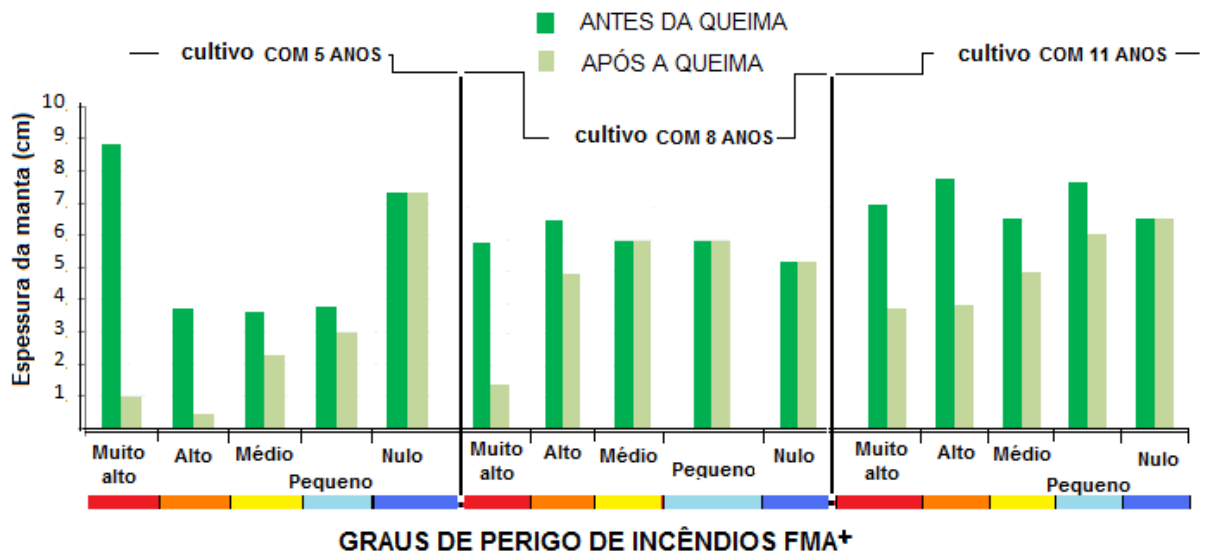
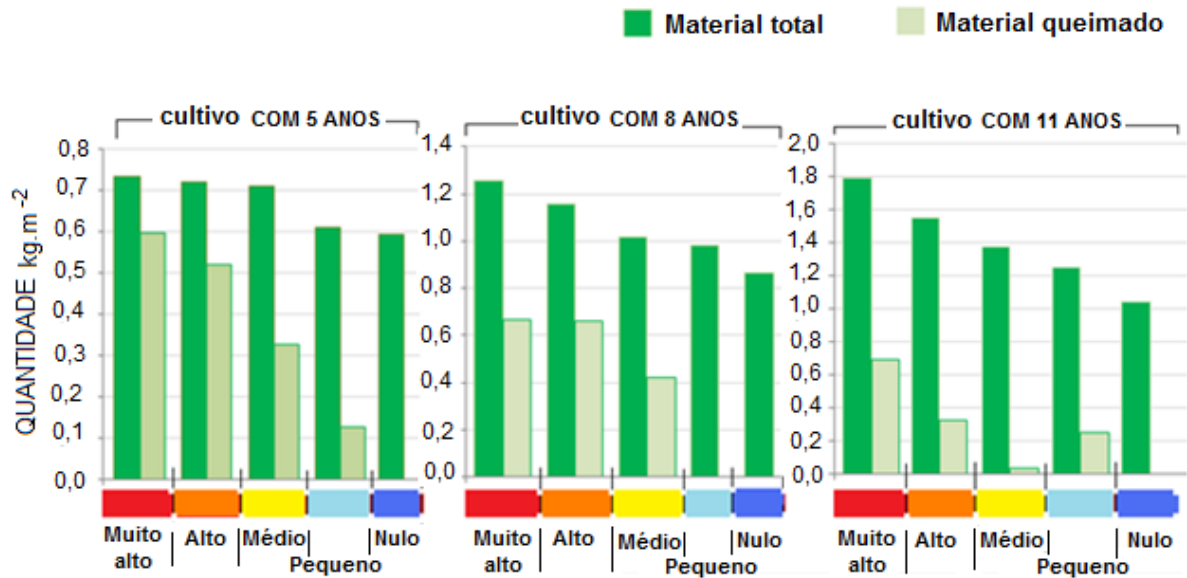


FIGURA 34 - Variação da espessura da manta de material combustível em função da queima das parcelas nos diferentes graus de perigo de incêndios FMA⁺
Fonte: o autor (2015)

A Figura 35 apresenta a quantidade de material combustível fino consumido pelo fogo em função do grau de perigo, onde se pode observar que à medida que o grau de perigo aumenta, a quantidade de material consumido também é maior. Soares (1985) ressalta que 70 a 80% do material combustível disponível em uma floresta é formado por materiais com diâmetro inferior a 2,5 cm. Em períodos chuvosos, o material combustível disponível para queima costuma diminuir significativamente. Considerando-se que o FMA⁺ reflete as condições de ocorrência e propagação do fogo, por ser calculado com base nas variáveis meteorológicas e no número de dias sem chuva, pode-se dizer que a quantidade de material combustível disponível aumenta à medida que o grau de perigo é maior. Rego e Botelho (1990) destacam que a disponibilidade do material combustível pode mudar de acordo com a hora, a época do ano, o estrato, o tempo atmosférico, a vegetação e a intensidade do fogo. Dessa forma, verifica-se que a FMA⁺ representa uma ferramenta eficiente para estimar o consumo de material combustível.



GRAUS DE PERIGO DE INCÊNDIOS FMA⁺

FIGURA 35 – Material combustível consumido pelo fogo das classes (Ln1, Ln2 e Lv) em função dos graus de perigo de incêndios FMA⁺

Fonte: o autor (2015)

A análise de variância multifatorial para a quantidade de material combustível consumido (APÊNDICE 6) mostra diferença significativa ao nível de 95% de significância, em função dos graus de perigo de incêndios e para as idades dos povoamentos. O teste SNK foi aplicado para as diferentes idades onde foram verificadas heterogeneidades. O teste SNK foi também aplicado para os graus de perigo, verificando-se que os graus de perigo nulo, pequeno, médio, alto e muito alto apresentaram-se heterogêneos em função do consumo de material combustível.

A Figura 36 apresenta a quantidade de material combustível da classe LB (material de 0,7 0 2,5 cm de diâmetro) consumida pelo fogo em função dos graus de perigo, podendo-se observar que para o cultivo de 5 anos, o maior volume consumido foi registrado no grau de perigo alto. Constataram-se também registros negativos, que podem ser considerados normais para esta classe. A quantidade de material queimado dessa classe foi pouco expressiva. Esse consumo irregular dos materiais lenhosos pode ser atribuído ao tempo de resposta diferenciado para os materiais dessa classe (SOARES 1985; SOARES e BATISTA 1987; BATISTA 1990; PEREIRA, 2009). Segundo Rego e Botelho (1990), a expressão das dimensões dos combustíveis (relação superfície/volume) influencia diretamente as características dos materiais combustíveis e, conseqüentemente, o comportamento do fogo.

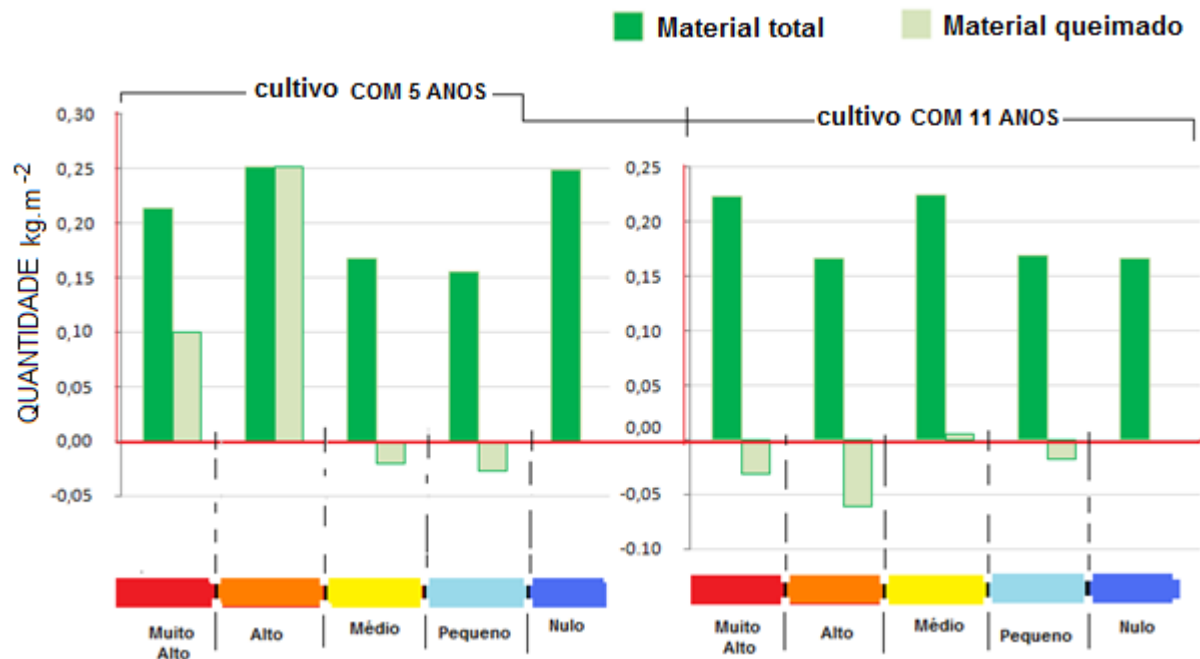


FIGURA 36 - Material combustível consumido pelo fogo da classe (LB) em função dos graus de perigo de incêndios FMA⁺
Fonte: o autor (2015)

O teste SNK para o consumo de material da classe LB em função da idade (APÊNDICE 7), demonstra a heterogeneidade entre a área de 5 anos quando comparada com as áreas de 8 e 11anos. O teste SNK para o consumo de material da classe LB em função dos graus de perigo, revela que os graus de perigo alto e muito alto são heterogêneos, quando comparados com os graus nulo, pequeno e médio.

A Figura 37 apresenta o ajuste de função para o consumo de material combustível das classes Ln1; Ln2 e Lv onde foram obtidos valores R² de 0,89; 0,79 e 0,81 para as áreas de 5, 8 e 11 anos, respectivamente.

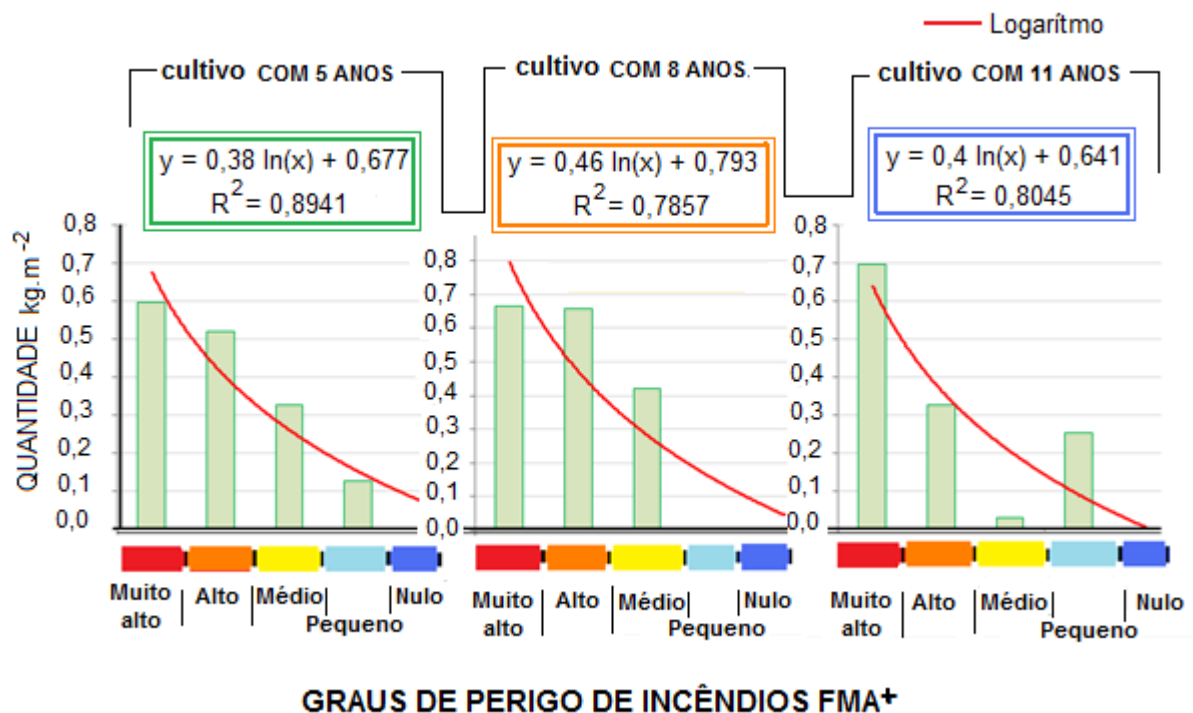


FIGURA 37 - Ajuste de funções logarítmicas para a quantidade de material combustível consumida pelo fogo em função dos graus de perigo de incêndios FMA⁺
 Fonte: o autor (2015)

As diferenças nos parâmetros do comportamento do fogo observadas entre os cultivos com diferentes idades expressam a complexidade que envolve o estudo do comportamento do fogo. Nesse sentido, vários autores têm descrito que as características dos combustíveis florestais e do comportamento do fogo são muitas vezes mal correlacionadas com os tipos de vegetação, porque muitas vezes os mesmos tipos de vegetação podem apresentar diferentes características dos combustíveis florestais e, conseqüentemente, comportamento do fogo e incêndios completamente diferentes, pois a carga de combustível, densidade do cultivo, tamanho e características do arranjo podem mudar ao longo do espaço e do tempo (DEEMING *et al.*, 1978; ANDREWS, 1986; MILLER *et al.*, 2003; LUTES, 2009; WU *et al.*, 2011). Essas diferenças foram observadas neste trabalho, principalmente na área de 5 anos, onde as condições de arranjo e a maior incidência de raios solares junto ao solo fazem com que as condições de inflamabilidade do combustível sejam completamente diferentes das áreas com idades de 8 e 11 anos, muito embora as características físicas e químicas sejam as mesmas. Isso pode ser explicado pelo fato de que o arranjo do material menos compactado e o cultivo “mais aberto”

permitem que as interações do combustível fino com ambiente sejam mais dinâmicas, perdendo umidade mais rapidamente, como também condições favoráveis de arranjo, possibilitando maiores intensidades do fogo.

4.3. ANÁLISES DE CORRELAÇÃO

A matriz de correlação apresentada na Tabela 16 mostra as associações existentes entre o índice de perigo de incêndios (FMA^+) e os parâmetros do comportamento do fogo e das variáveis meteorológicas.

O uso da escala de 1 a 5 (graus de perigo do índice da FMA^+) para os cálculos de correlação, bem como os valores da FMA^+ obtidos com os cálculos diários, apresentaram valores muito próximos, indicando um bom ajuste do índice FMA^+ para a região. Quando foram usados os graus de perigo, os coeficientes de correlação (r) obtidos com os parâmetros do comportamento do fogo indicaram uma associação de 0,75 para a intensidade do fogo; 0,64 para a velocidade de propagação do fogo; 0,72 para o comprimento de chamas e de 0,71 para a altura de carbonização da casca das árvores. Quando foram usados os valores diários da FMA^+ os coeficientes de correlação (r) indicaram uma associação de 0,74 para a intensidade do fogo; 0,62 para a velocidade de propagação; 0,67 para o comprimento de chamas e de 0,70 para a altura de carbonização da casca das árvores.

Os coeficientes de correlação (r) de 0,00 e 0,04 obtidos para o grau de perigo e valor diário da FMA^+ , respectivamente, em função da idade, evidenciam que os povoamentos de *Pinus taeda* com diferentes idades apresentam grande variação dos parâmetros do comportamento do fogo.

Os coeficientes (r) obtidos para os graus de perigo com as variáveis meteorológicas apresentaram uma associação de 0,52; -0,61 e 0,56 para a velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura, respectivamente. Os coeficientes obtidos para os valores diários da FMA^+ apresentaram uma associação de 0,41; -0,54 e 0,59 para a velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura, respectivamente. As correlações negativas para a umidade relativa indicam que quanto maior o grau de perigo ou o seu valor diário, menor é a umidade

do ar. De maneira geral, verifica-se que a FMA⁺ apresentou maior correlação com os parâmetros do comportamento do fogo do que as correlações das variáveis meteorológicas (velocidade do vento, umidade relativa e temperatura), provavelmente por haver influência da precipitação pluviométrica de dias anteriores no seu cálculo.

Os coeficientes (r) obtidos para os parâmetros do comportamento do fogo em função da velocidade do vento apresentaram uma associação de 0,68 para a intensidade do fogo, 0,70 para a velocidade de propagação, 0,69 para o comprimento de chamas e 0,67 para a altura de carbonização da casca das árvores. Para a umidade relativa do ar foram obtidos coeficientes de -0,74 para a intensidade do fogo, -0,73 para a velocidade de propagação, -0,73 para o comprimento de chamas e -0,80 para a altura de carbonização da casca das árvores, onde as correlações negativas indicam que quanto maior a intensidade, velocidade propagação e comprimento de chamas, menor é a umidade do ar.

Batista, Beutling e Pereira (2013), ao realizarem queimas prescritas em parcelas de *Pinus elliottii* em campo destacaram que a umidade relativa foi a variável que apresentou correlações significativas com a maioria das variáveis analisadas, observando (r) de 0,69 com a altura das chamas.

Para a temperatura foram obtidos coeficientes (r) de 0,70 para a intensidade do fogo, 0,70 para a velocidade de propagação, 0,65 para o comprimento de chamas e 0,74 para a altura de carbonização da casca das árvores (TABELA 16). Os coeficientes observados entre os parâmetros do comportamento do fogo com as variáveis meteorológicas contribuem para explicar as grandes variações que ocorrem nos incêndios florestais, como por exemplo, as diferenças observadas no comportamento do fogo durante o dia e durante a noite.

Os maiores coeficientes de correlação obtidos foram observados entre os parâmetros do comportamento do fogo, evidenciando que o fogo é um fenômeno que ocorre em cadeia e onde os parâmetros que descrevem o seu comportamento estão fortemente relacionados.

Os coeficientes de correlação obtidos para intensidade de 0,94 para a velocidade de propagação e de 0,88 para o comprimento de chamas devem ser atribuídos ao fato da intensidade ter sido calculada a partir destas duas variáveis pela equação de Byram Para a intensidade e altura de carbonização da casca foi obtido um coeficiente (r) de 0,89. Para o comprimento de chamas foram obtidas

associações de 0,94 tanto para a velocidade de propagação, quanto para a altura de carbonização da casca. Para o comprimento de chamas foi obtida uma associação de 0,96 para a altura de carbonização da casca.

As correlações observadas (TABELA 16) corroboram com diversas pesquisas que têm sido realizadas em muitos países (BYRAM, 1959; ROTHERMEL, 1972; BURGAN e ROTHERMEL, 1984; FERNANDES, 2001; VEGA *et al.*, 2006), relacionando as características dos combustíveis e as condições meteorológicas com as variáveis do comportamento do fogo, com o objetivo de estabelecer modelos de previsão das características dos incêndios, bem como dos seus efeitos potenciais sobre as florestas.

As fortes correlações observadas entre os parâmetros do comportamento do fogo corroboram com trabalhos desenvolvidos por vários autores como Byram (1959) e Rothermel (1972), que desenvolveram equações baseadas nessas relações, sendo tais associações a base para a modelagem do comportamento do fogo.

A carga de material combustível não apresentou forte correlação com os parâmetros do comportamento do fogo e apresentou baixa associação com a FMA⁺, com valores de 0,41 para o grau de perigo e 0,46 para o valor diário. Essa baixa correlação provavelmente está relacionada com a queima parcial do material, pois muito embora a quantidade de material consumido tenha sido gradual, com maiores quantidades consumidas no grau muito alto (5), grande parte do combustível não foi consumida pelo fogo.

Batista, Beutling e Pereira (2013), trabalhando em experimentos de campo em povoamentos de *Pinus elliottii*, também obtiveram as maiores correlações entre as variáveis do comportamento do fogo (0,862 para “altura de chama” x “velocidade de propagação”), seguida da correlação entre “Intensidade” x “altura de chama” com coeficiente de 0,7774).

TABELA 16 - Matriz de correlação dos parâmetros do comportamento do fogo em função das variáveis meteorológicas e do índice de perigo de incêndios FMA⁺

	Intensidade	V propagação	C chamas	H car	Idade	Tipo queima	V vento	UR	Temp	CMC	FMA ⁺ Grau
Intensidade											
V propagação	0,94										
C chamas	0,88	0,94									
H car	0,89	0,94	0,96								
Idade	-0,17	-0,35	-0,35	-0,33							
Tipo queima	0,23	0,22	0,13	0,14	0,02						
V vento	0,68	0,70	0,69	0,67	-0,02	0,16					
UR	-0,74	-0,73	-0,73	-0,80	0,08	-0,06	-0,73				
Temp	0,70	0,70	0,65	0,74	-0,16	0,04	0,54	-0,72			
CMC	0,18	-0,08	-0,04	-0,04	0,76	-0,05	0,06	-0,03	0,03		
FMA ⁺ Grau	0,75	0,64	0,72	0,71	0,00	0,03	0,52	-0,61	0,56	0,41	
FMA ⁺ Valor	0,74	0,62	0,67	0,70	0,04	0,02	0,41	-0,54	0,59	0,46	0,96

NOTA:

Variáveis	Descrição	Unidade
Intensidade	Intensidade do fogo	kcal.m ⁻¹ .s ⁻¹
V propagação	Velocidade de propagação do fogo	m.s ⁻¹
C chamas	Comprimento da chama	cm
H car	Altura de carbonização da casca das árvores	cm
Idade	Idade dos povoamentos (5; 8 e 11)	Anos
Tipo.queima	1 = contra ao vento e 2 = a favor do vento)	
V vento	velocidade do vento	m.s ⁻¹
UR	Umidade Relativa do Ar	%
Temp	Temperatura do ar	°C
CMC	Carga do Material Combustível	Ton.ha ⁻¹
FMA ⁺ Grau	Grau obtido do cálculo do índice	
FMA ⁺ Valor	Valor obtido do cálculo do índice	

4.3.1 Modelos para estimativa dos parâmetros do comportamento do fogo

Nas Tabelas 17, 18 e 19 são apresentados os modelos de regressão desenvolvidos para estimativa das variáveis do comportamento do fogo em função do índice de perigo de incêndios FMA^+ , das variáveis meteorológicas (umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura) e da idade dos povoamentos. Foram ajustados 4 modelos pelas diferentes combinações do índice FMA^+ , variáveis meteorológicas e idade dos povoamentos, para estimativa da velocidade de propagação (V_{fogo}). Para a estimativa do comprimento de chamas (C_{chamas}) foram ajustados 4 modelos e para a estimativa da intensidade do fogo (I) também foram ajustados 4 modelos, usando-se os mesmos procedimentos anteriores.

Para avaliação de desempenho dos modelos foram utilizados os seguintes critérios: 1) Coeficiente de determinação – R^2 e R^2 ajustado; 2) Erro padrão da estimativa (S_{yx} - absoluto e $S_{yx\%}$ - percentual)

De maneira geral, os modelos desenvolvidos apresentaram bons coeficientes de determinação. Esses resultados são importantes para fornecer subsídios para se avaliar os limites de velocidade que se pode esperar do fogo, podendo ser aplicados para a prática de queimas prescritas em atividades de manejo de material combustível, ou ainda na prevenção e combate aos incêndios em povoamentos de *Pinus taeda*.

4.3.1.1 Estimativa da velocidade de propagação

De acordo com Soares e Batista (2007), a velocidade de propagação ou taxa de propagação, em estudos de comportamento do fogo, é um dos mais importantes parâmetros na previsão do comportamento do fogo.

Os modelos matemáticos desenvolvidos para estimar a velocidade de propagação do fogo (TABELA 17) apresentaram coeficientes de determinação de 0,927 a 0,928. Os outros parâmetros estatísticos para avaliação de desempenho dos modelos são apresentados no APÊNDICE 8.

Soares e Batista (2007) ressaltam que a velocidade de propagação do fogo é um dos parâmetros mais difíceis de ser estimado, devido a diversidade de fatores ambientais associados à propagação do fogo. Embora muito variável, por depender de muitos fatores, vários trabalhos têm sido desenvolvidos por diversos autores em diferentes condições de queima. Beutling (2009) obteve modelos para estimar a velocidade de propagação com coeficientes de determinação de 0,53 a 0,79 em ensaios laboratoriais com acículas de *Pinus* spp, em diferentes condições de carga e de inclinação. Batista, Beutling e Pereira (2013), trabalhando em campo com parcelas nas mesmas dimensões, desenvolveram modelos com coeficientes de determinação de 0,827 a 0,877 para povoamentos de *Pinus elliottii*.

TABELA 17 – Modelos para a estimativa da velocidade de propagação do fogo com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndios FMA⁺

Modelos	
1	$V_{\text{fogo}} = b_0 + b_1 \cdot \text{Idade} + b_2 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}} + b_3 \cdot \text{Idade}^2 + b_4 \cdot \text{Tipq}^2 + b_5 \cdot \text{URA}^2 + b_6 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}}^2 + b_7 \cdot \text{Idade} \cdot V_{\text{ven}} + b_8 \cdot \text{Idade} \cdot \text{URA} + b_9 \cdot \text{Idade} \cdot \text{Temp} + b_{10} \cdot \text{Tipq} \cdot V_{\text{ven}} + b_{11} \cdot \text{Tipq} \cdot \text{Temp} + b_{12} \cdot V_{\text{ven}} \cdot \text{Temp}$
2	$V_{\text{fogo}} = b_0 + b_1 \cdot \text{Idade} + b_2 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}} + b_3 \cdot \text{Idade}^2 + b_4 \cdot \text{Tipq}^2 + b_5 \cdot \text{URA}^2 + b_6 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}}^2 + b_7 \cdot \text{Idade} \cdot V_{\text{ven}} + b_8 \cdot \text{Idade} \cdot \text{URA} + b_9 \cdot \text{Idade} \cdot \text{Temp} + b_{10} \cdot \text{Tipq} \cdot \text{Temp} + b_{11} \cdot V_{\text{ven}} \cdot \text{Temp}$
3	$V_{\text{fogo}} = b_0 + b_1 \cdot \text{Idade} + b_2 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}} + b_3 \cdot \text{Idade}^2 + b_4 \cdot \text{Tipq}^2 + b_5 \cdot V_{\text{ven}}^2 + b_6 \cdot \text{URA}^2 + b_7 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}}^2 + b_8 \cdot \text{Idade} \cdot V_{\text{ven}} + b_9 \cdot \text{Idade} \cdot \text{URA} + b_{10} \cdot \text{Idade} \cdot \text{Temp} + b_{11} \cdot \text{Tipq} \cdot V_{\text{ven}} + b_{12} \cdot \text{Tipq} \cdot \text{Temp} + b_{13} \cdot V_{\text{ven}} \cdot \text{Temp}$
4	$V_{\text{fogo}} = b_0 + b_1 \cdot \text{Idade} + b_2 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}} + b_3 \cdot \text{Idade}^2 + b_4 \cdot \text{Tipq}^2 + b_5 \cdot V_{\text{ven}}^2 + b_6 \cdot \text{URA}^2 + b_7 \cdot \text{Temp} + b_8 \cdot \text{FMA}^+_{\text{valor}}^2 + b_9 \cdot \text{Idade} \cdot V_{\text{ven}} + b_{10} \cdot \text{Idade} \cdot \text{URA} + b_{11} \cdot \text{Idade} \cdot \text{Temp} + b_{12} \cdot \text{Tipq} \cdot V_{\text{ven}} + b_{13} \cdot \text{Tipq} \cdot \text{Temp} + b_{14} \cdot V_{\text{ven}} \cdot \text{Temp}$

NOTA: V_{fogo} = velocidade de propagação do fogo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); URA = umidade relativa do ar (%); Temp = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); V_{ven} = velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $\text{FMA}^+_{\text{Grau}}$ = grau obtido do cálculo do índice; $\text{FMA}^+_{\text{valor}}$ = valor obtido do cálculo do índice, Idade = idade do povoamento (anos); Tipq = tipo de queima (1 = contra ao vento e 2 = a favor do vento); V_{fog} = velocidade de propagação do fogo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fonte: Autor (2015)

4.3.1.2 Estimativa do comprimento de chammas

De acordo com Batista, Beutling e Pereira (2013), os experimentos sobre o comportamento do fogo em ambiente natural aberto são difíceis de serem realizados, devido à dificuldade em controlar e/ou monitorar as variáveis envolvidas no processo de

combustão. No entanto, esse é um dos meios indispensáveis para o entendimento das relações entre o ambiente florestal e a combustão, possibilitando o estabelecimento das bases para a previsão do comportamento do fogo em áreas florestais. A Tabela 18 apresenta os modelos desenvolvidos para a estimativa do comprimento de chamas, numerados de 1 a 4 em função dos parâmetros estatísticos. De maneira geral, os modelos para estiva do comprimento de chamas (C_{chamas}) apresentaram coeficientes de determinação de 0,949 a 0,951. Os outros parâmetros estatísticos para avaliação de desempenho dos modelos e os coeficientes dos modelos para a estimativa da velocidade de propagação são apresentados no APÊNDICE 9.

Batista, Beutling e Pereira (2013) desenvolveram modelos para a estimativa da altura de chamas em povoamentos de *Pinus elliotii* onde obtiveram coeficientes de determinação de 0,835 a 0,966.

TABELA 18 – Modelos para a estimativa do comprimento de chamas com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndios FMA^+

Modelos	
1	$C_{chamas} = b_0 + b_1 \cdot V_{ven} + b_2 \cdot Idade^3 + b_3 \cdot V_{ven}^3 + b_4 \cdot FMA^+_{Grau}^3 + b_5 \cdot FMA^+_{valor}^3 + b_6 \cdot \ln(Tipq) + b_7 \cdot \ln(URA) + b_8 \cdot \ln(Temp) + b_9 \cdot Idade \cdot Tipq + b_{10} \cdot Idade \cdot V_{ven} + b_{11} \cdot Idade \cdot FMA^+_{valor} + b_{12} \cdot Tipq \cdot V_{ven} + b_{13} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{Grau} + b_{14} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{valor} + b_{15} \cdot V_{ven} \cdot URA + b_{16} \cdot V_{ven} \cdot Temp + b_{17} \cdot URA \cdot Temp + b_{18} \cdot URA \cdot FMA^+_{Grau} + b_{19} \cdot FMA^+_{Grau} \cdot FMA^+_{valor}$
2	$C_{chamas} = b_0 + b_1 \cdot V_{ven} + b_2 \cdot Idade^3 + b_3 \cdot V_{ven}^3 + b_4 \cdot FMA^+_{Grau}^3 + b_5 \cdot FMA^+_{valor}^3 + b_6 \cdot \ln(Tipq) + b_7 \cdot \ln(URA) + b_8 \cdot \ln(Temp) + b_9 \cdot Idade \cdot Tipq + b_{10} \cdot Idade \cdot V_{ven} + b_{11} \cdot Idade \cdot URA + b_{12} \cdot Idade \cdot FMA^+_{valor} + b_{13} \cdot Tipq \cdot V_{ven} + b_{14} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{Grau} + b_{15} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{valor} + b_{16} \cdot V_{ven} \cdot URA + b_{17} \cdot V_{ven} \cdot Temp + b_{18} \cdot URA \cdot Temp + b_{19} \cdot URA \cdot FMA^+_{Grau} + b_{20} \cdot FMA^+_{Grau} \cdot FMA^+_{valor}$
3	$C_{chamas} = b_0 + b_1 \cdot V_{ven} + b_2 \cdot Idade^3 + b_3 \cdot V_{ven}^3 + b_4 \cdot FMA^+_{Grau}^3 + b_5 \cdot FMA^+_{valor}^3 + b_6 \cdot \ln(Tipq) + b_7 \cdot \ln(URA) + b_8 \cdot \ln(Temp) + b_9 \cdot Idade \cdot Tipq + b_{10} \cdot Idade \cdot V_{ven} + b_{11} \cdot Idade \cdot FMA^+_{valor} + b_{12} \cdot Tipq \cdot V_{ven} + b_{13} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{Grau} + b_{14} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{valor} + b_{15} \cdot V_{ven} \cdot Temp + b_{16} \cdot V_{ven} \cdot Temp + b_{17} \cdot URA \cdot FMA^+_{Grau} + b_{18} \cdot FMA^+_{Grau} \cdot FMA^+_{valor}$
4	$C_{chamas} = b_0 + b_1 \cdot V_{ven} + b_2 \cdot Idade^3 + b_3 \cdot V_{ven}^3 + b_4 \cdot FMA^+_{Grau}^3 + b_5 \cdot FMA^+_{valor}^3 + b_6 \cdot \ln(Tipq) + b_7 \cdot \ln(URA) + b_8 \cdot \ln(Temp) + b_9 \cdot Idade \cdot Tipq + b_{10} \cdot Idade \cdot V_{ven} + b_{11} \cdot Idade \cdot FMA^+_{valor} + b_{12} \cdot Tipq \cdot V_{ven} + b_{13} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{Grau} + b_{14} \cdot Tipq \cdot FMA^+_{valor} + b_{15} \cdot URA \cdot Temp + b_{16} \cdot URA \cdot FMA^+_{Grau} + b_{17} \cdot FMA^+_{Grau} \cdot FMA^+_{valor}$

NOTA: C_{chamas} = comprimento da chama (cm); URA = umidade relativa do ar (%); Temp = temperatura do ar (°C); V_{ven} = velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$); FMA^+_{Grau} = grau obtido do cálculo do índice; FMA^+_{valor} = valor obtido do cálculo do índice, Idade = idade do povoamento (anos); Tipq = tipo de queima (1 = contra ao vento e 2 = a favor do vento); V_{fog} = velocidade de propagação do fogo ($m \cdot s^{-1}$)

Fonte: Autor (2015)

4.3.1.3 Estimativa da intensidade do fogo

De acordo com Byram (1959), a intensidade do fogo pode ser estimada através do comprimento das chamas. Soares e Batista (2007) ressaltam que a medição do comprimento das chamas é mais difícil de ser obtida em ambiente aberto. Batista, Lima e Soares (1993) descrevem que o comprimento das chamas é a variável que apresenta melhor associação com as demais variáveis do comportamento do fogo.

Os modelos matemáticos desenvolvidos para estimar a intensidade do fogo (TABELA 19) apresentaram coeficientes de determinação de 0,881 a 0,885. Os outros parâmetros estatísticos para avaliação de desempenho dos modelos e os coeficientes para a estimativa da velocidade de propagação são apresentados no APÊNDICE 10.

Beutling (2009), em ensaios laboratoriais com acículas de *Pinus* spp, em diferentes condições de carga e de inclinação, desenvolveu modelos para estimar a intensidade do fogo com base na altura de chamas, onde obteve coeficientes de determinação de 0,817 a 0,831. Batista, Beutling e Pereira (2013) desenvolveram modelos para a estimativa da intensidade do fogo em povoamentos de *Pinus elliotii* e obtiveram coeficientes de determinação de 0,852 a 0,906.

TABELA 19 – Modelos para a estimativa da intensidade do fogo com base nas variáveis meteorológicas, na idade dos povoamentos e no índice de perigo de incêndios FMA⁺

Modelos	
1	$I = b_0 + b_1.V_{ven} + b_2.URA^3 + b_3.Temp^3 + b_4.FMA_{Grau}^+{}^3 + b_5.FMA_{valor}^+{}^3 + b_6.In(Idade) + b_7.In(Temp) + b_8.Idade.URA + b_9.Tipq.FMA_{valor}^+ + b_{10}.V_{ven}.URA + b_{11}.V_{ven}.Temp + b_{12}.URA.FMA_{valor}^+ + b_{13}.FMA_{Grau}^+.FMA_{valor}^+$
2	$I = b_0 + b_1.V_{ven} + b_2.URA^3 + b_3.Temp^3 + b_4.FMA_{Grau}^+{}^3 + b_5.In(Idade) + b_6.In(Temp) + b_7.Idade.URA + b_8.Tipq.FMA_{valor}^+ + b_9.V_{ven}.URA + b_{10}.URA.FMA_{valor}^+$
3	$I = b_0 + b_1.V_{ven} + b_2.URA^3 + b_3.Temp^3 + b_4.FMA_{Grau}^+{}^3 + b_5.In(Idade) + b_6.In(Temp) + b_7.Idade.URA + b_8.Tipq.FMA_{valor}^+ + b_9.V_{ven}.URA + b_{10}.V_{ven}.Temp + b_{11}.URA.FMA_{valor}^+$
4	$I = b_0 + b_1.V_{ven} + b_2.URA^3 + b_3.Temp^3 + b_4.FMA_{Grau}^+{}^3 + b_5.FMA_{valor}^+{}^3 + b_6.In(Idade) + b_7.In(Temp) + b_8.Idade.URA + b_9.Tipq.FMA_{valor}^+ + b_{10}.V_{ven}.URA + b_{11}.V_{ven}.Temp + b_{12}.URA.FMA_{valor}^+$

NOTA: I = intensidade do fogo (kcal.m⁻¹.s⁻¹); URA = umidade relativa do ar (%); Temp = temperatura do ar (°C); V_{ven} = velocidade do vento (m.s⁻¹); FMA⁺_{Grau} = grau obtido do cálculo do índice; FMA⁺_{valor} = valor obtido do cálculo do índice, Idade = idade do povoamento (anos); Tipq = tipo de queima (1 = contra ao vento e 2 = a favor do vento); V_{fog} = velocidade de propagação do fogo (m.s⁻¹)

Fonte: Autor (2015)

5 CONCLUSÕES

- Verificou-se uma forte relação entre o comportamento do fogo e o índice de perigo de incêndios FMA^+ durante as queimas prescritas nos povoamentos comerciais de *Pinus taeda*;
- Os parâmetros do comportamento do fogo apresentaram diferenças significativas em função da idade dos cultivos florestais quando submetidas a queimas em um mesmo grau de perigo. Os povoamentos mais jovens apresentam os maiores riscos de danos às árvores;
- As análises de correlação entre a FMA^+ e os parâmetros do comportamento do fogo demonstraram que o índice pode ser utilizado para a prevenção e combate aos incêndios, assim como para o planejamento e execução de queimas prescritas;
- Os modelos de regressão desenvolvidos para a estimativa do comportamento do fogo em função da FMA^+ poderão auxiliar no manejo e gestão de povoamentos de *Pinus taeda*;
- As informações obtidas sobre o comportamento do fogo em povoamentos comerciais de *Pinus taeda* podem ser úteis para entidades públicas e privadas no planejamento de supressão, bem como, para a gestão e manejo do fogo através de queimas prescritas no sul do Brasil.

6 RECOMENDAÇÕES

Os resultados observados demonstram que o índice FMA⁺ apresenta um enorme potencial de utilização. Dessa forma, recomenda-se que os estudos de queimas prescritas em outras formas de vegetação sejam também desenvolvidos com o índice.

Verificou-se que a primeira poda em cultivos jovens de pinus representa um fator de redução de perigo de incêndio de copa, uma vez que essa prática elimina a continuidade vertical do material combustível. Nesse sentido, recomenda-se que a primeira poda seja efetuada em 100% das árvores, uma vez que a não da mesma pode elevar consideravelmente os danos ocasionados pelo fogo.

A replicação de pesquisas dessa natureza é fundamental, principalmente para áreas dependentes do fogo como os campos sulinos e o cerrado, onde os resultados obtidos demonstram que o uso da FMA⁺ é ferramenta estratégica para a prática de queimas prescritas e manejo do fogo, como também para o planejamento e combate aos incêndios, que frequentemente ocorrem nestes ambientes.

REFERÊNCIAS

- ALDAZ, L. **Caracterização parcial do regime de chuvas no Brasil**. Rio de Janeiro: DNMET, Sudene, DMM, Publicação técnica. v. 14, 1971.
- ALESSIO, A. C. J; PEÑUELAS, A. J; LLUSIÀ, A. R; OGAYA, A. M. ESTIARTE, A; LILLIS, M. Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. **International Journal of Wildland Fire**. v. 17, p. 274 – 286, 2008.
- ALLGOWER, C. E; ANDERSON, B. D; BALDWIN, A. R; BALEWSKI, J. **The STAR endcap electromagnetic calorimeter**. Preprint submitted to Elsevier Preprint. Partially supported by the U.S. National Science. Supported by the U.S. Department of Energy. p. 1 - 15, 2003.
- ALLOZA, J. A; BAEZA, M. J; RIVA, J. D. I; DUGUY, B; ECHEVERRIA, M.T; IBARRA, P; LLOVET, J; PEREZ-CABELLO, F; ROVIRA, P; VALLEJO, V. R. A model to evaluate the ecological vulnerability to forest fires in Mediterranean ecosystems. **Forest Ecology and Management**, p. 203 - 234, 2006.
- ALVAREZ, A; GARCIA, M; VAYREDA, J; RETANA, J. **Patterns of fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests in the Western Mediterranean Basin**, CREAM (Centre for Ecological Research and Forestry Applications) and Unit of Ecology, Autonomous University of Barcelona, Barcelona, Catalonia, Spain, 2011.
- ANDERSON, H. E. Forest fuel ignitibility. **Fire Technology**, v. 6, p. 312 – 319, 1970.
- ANDRÉ, J. C. S; VIEGAS, D. X. Modelos de propagação de fogos florestais: estado-da-arte para utilizadores parte II: modelos globais e sistemas informáticos. Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Mecânica, **Revista Silva Lusitana**, v. 10, n. 2 Lisboa, 2002.
- ANDREWS, P. L. **BEHAVE**: fire behavior prediction and fuel modeling system—BURN subsystem. USDA Forest Service General Technical Report INT-194, 1986.
- ANDREWS, P. L; BEVINS, C. D; SELI, R.C. Behave Plus fire modeling system user's Guide, version 2.0., USDA, **Forest Service, Rocky Mountain Research Station**, General Technical Report RMRS-GTR- 2003.
- ARROYO, L. A; PASCUAL, C; MANZANERA, J. A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing, **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1239 – 1252, 2008.
- ARROYO, L. A; COCERO, D; MANZANERA, J. A; GARCIA-MONTERO, L.G; PASCUAL, C. El empleo de clasificadores de contexto para la obtencion de cartografía en la interfase urbano forestal. **GeoFocus**, v. 5, p.115 - 128, 2005.

AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos. **Revisão de Suely Bastos**, 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BALDO, M. C; MARTINS, M. L, NERY, J. T. Análise da estrutura da precipitação pluviométrica no Sul do Brasil. **Boletim de Geografia da UEM**, v. 19, p. 71 - 98, 2001.

BALLING, R. C. J; MEYER, G. A; WELLS, S. G. Relation of surface climate and burned area in Yellowstone National Park. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 60, p. 285 – 293, 1992.

BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1990, 115p.

BATISTA, A. C; BEUTLING, A; PEREIRA, J. F. Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliotii*. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p 779 - 787, 2013.

BATISTA, A. C; LIMA, G. S; SOARES, R. V. Altura de carbonização da casca das árvores como estimador da intensidade do fogo em queima controlada. In: Anais do I Congresso Florestal Panamericano e VII Congresso Florestal Brasileiro. Curitiba, PR, **Anais...**, p.169-170. 1993.

BATISTA, A. C. **Avaliação da queima controlada em povoamentos de *Pinus taeda* L. no norte do Paraná**. 108p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

BAUTISTA, S; BELLOT, J; VALLEJO, V. R. Efectos de la siembra de herbáceas y la cubierta de paja sobre la escorrentía y la erosión post-incendio en ambiente semiárido. In 'Geomorfología en España: III Reunión Nacional de Geomorfología. **Anais....**v. 2, p. 14 – 16, 1994.

BEER. T. **The interaction of wind and fire**. Boundary-Layer Meteorology, v. 54, n. 3 p. 287 – 308, 1991.

BERGAMASCHI, H; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. EMATER, Ascar, 84 p. 2014.

BERGONA, Y; CYR, D; GIRARDIC, M. P; CARCAILLET, C. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. CSIRO Publishing, **International Journal of Wildland Fire**, v.19, p.1127 - 1139, 2010.

BEUTLING, A. **A modelagem do comportamento do fogo com base em experimentos laboratoriais e de campo**. 144p. Tese Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BOND, J. W; VAN-WILGEN, B. W. Surviving fires – vegetative and reproductive responses. Map from inside cover **Fire and Plants**, Chapman & Hall, London, v. 3 p. 36 – 50,1996.

BOND, J. W; KEELEY, J. E.; Fire as global “herbivore”. **The ecology and evolution of flammable ecosystems. Trends in Ecology and Evolution**. USGS- Western Ecological Research Center, v. 20, n. 7, p. 387 – 394, 2005.

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. **Revista Floresta e Ambiente**. v.18, n. 2, p.153 - 159, 2011.

BOTELHO, H; VENTURA, J. Modelos de comportamento do fogo. In: REGO, F. C; BOTELHO, H. A técnica do fogo controlado. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, **Anais...** p. 49 - 55, 1990.

BOWMAN, D. M. J. S; BALCH, J. K; ARTAXO, P; BOND, W. J; CARLSON, J. M; COCHRANE, M. A. Fire in the Earth System. **Science**. v.324, p. 481 – 484, 2009.

BROTAK, E. A; REIFSNYDER, W. E. An investigation of the synoptic situations associated with major wildland fires. **J. Appl. Meteorol**, v.16, n.9, p. 867 – 870, 1977.

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

BROWN, J. K. Bulk densities of nonuniform surface fuels and their application to fire modeling. **Forest Science**, v.27, p.667-683, 1981.

BROWN, J. K.; OBERHEU, R. D; JOHNSTON, C. M. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. Odgen, Intermountain **Forest and Range Experiment Station**, 48p, 1982.

BURGAN, R. E.; ROTHERMEL, R. C. **Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system - FUEL subsystem**. Ogden: USDA Forest Service, General Technical Report INT-167, 126p, 1984.

BYRAM , G. M. **Combustion of forest fuels**. In: Davis, Kenneth P., ed. Forest fire control and use. New York: McGraw-Hill Book Co. 1959.

CAIN, M. D. Height of stem-bark char underestimates flame length in prescribed burns. **Fire Management**, v .45, p. 17 - 21, 1984.

CARDIL, A; MOLINA, D. M; RAMIREZ, J; VEGA-GARCÍA, C. Trends in adverse weather patterns and large wildland fires in Aragón (NE Spain) from 1978 to 2010. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. An interactive open-access journal of the European Geosciences Union. v. 13, p.1393 – 1399, 2013.

CARVALHO, P. A. C. F. **Modelação do risco de incêndio florestal com redes neurais artificiais: aplicação ao Parque Natural de Montesinho**. 180p. Dissertação (Mestrado em ciências e sistemas de informações geográficas) Instituto Superior de Estatística e Gestão da informação da Universidade Nova de Lisboa , Portugal, 2005.

CASTAÑEDA, A. **Zonificación para el manejo de incendios en plantaciones forestales en Colombia**. Boletín de Protección Forestal, n. 2, Colombia, 1997.

CFEPCS. **Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva**, disponível em www.iriflorestalcostaesilva.seed.pr.gov.br/ acessado em 2014.

CHANDLER, C; CHENEY, P; THOMAS, P; TRABAUD, L; WILLIAMS, D. **Fire Effects on Wildlife**. In: CHANDLER, C; CHENEY, P; THOMAS, P; TRABAUD, L; WILLIAMS, D. **Fire in forestry**. New York: John Wiley & Sons, 253p. 1983.

CHMURA, D; ANDERSON, P. D; HOWE, G. T; HARRINGTON, C. A; HALOFSKYD, J. E; PETERSON, D. L; SHAW, S. D. C; CLAIRB, B.S. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. **Forest Ecology and Management**. v. 261, p. 1121 - 1142, 2011.

CHUVIECO, E; AGUADO, I; COCERO, D; RIAÑO, D. Design of empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR analysis in Forest fire danger studies. **International Journal of Remote Sensing**. v. 24, p.1621 - 1637, 2003.

COSTA, E. Medidas da umidade relativa do ar em um ambiente fechado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 346 - 348, 2003.

COUNTRYMAN, C. M. Rating fire danger by the multiple basic index system. **Journal of Forestry**, 1966.

DAVIS, K. P. **Forest Fire: control and use**. McGraw-Hill. New York, 584p. 1959.

DEEMING, J. E; BURGAN, R. E; COHEN, J. D. **The national fire-danger rating system**. USDA Forest Service General Technical Report INT-39, 1978.

DEEMING, J. E; LANCASTER, J. W; FOSBERG, M. A; FURMAN, R. W; SCHROEDER, M. J. **National fire-danger rating system**. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-84, Rocky Mt. For. and Range Exp. Stn., Fort Collins, Colo. 165p. 1972.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Editora: Embrapa, 3 ed. 353 p. 2013.

FERNANDES P. M. Combining forest structure data and fuel modelling to classify fire hazard in Portugal. **Ann For Science**. v. 66, p. 411 - 415, 2009.

FERNANDES, P. M. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. **Forest Ecology and Management**, v. 144, n. 1, p. 67 - 74, 2001.

FERNANDES, P. M; CRUZ, M. G. **Plant flammability experiments offer limited insight into vegetation–fire dynamics interactions**. Centro de Investigação e Tecnologias Agro-Ambientais e Biológicas (CITAB), Departamento de Ciências Florestais e Arquitetura Paisagista, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, v. 194 p. 606 – 609. Portugal, 2012.

FERNANDEZ, C; VEGA, J. A; FONTURBEL, T; PEREZ-GOROSTIAGA, P; JIMENEZ, E; MADRIGAL, J. **Effects of wildfire, salvage logging and slash treatments on soil degradation**. Land Degradation & Development v. 18, p. 591 - 607, 2007.

FERRAN, A; SERRASOLSAS, I; VALLEJO, V. R. Soil evolution after fire in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis* forests. In 'Responses of Forest Ecosystems to Environmental Changes'. Eds A Teller, P Mathy, **JNR Jeffers**. p. 397– 404. (Elsevier: London, UK). 1992.

FERREIRA, H. R; TETTO, A. F; BATISTA, A. C. Ocorrência de incêndios florestais no Estado do Paraná no ano de 2011. In: III Seminário de Atualização Florestal, 2011, Irati. **Anais...**, 2011.

FERREIRA-LEITE, F; BENTO-GONÇALVES, A; LOURENÇO, L; ÚBEDA, X; VIEIRA, A. Grandes incêndios florestais em Portugal Continental, como resultado das perturbações nos regimes do fogo no mundo mediterrâneo. **Silva Lusitana**, n. 1 v.9, p. 129 - 144, 2013.

FINNEY, M. A. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. RMRS-RP-4, OGDEN, UT: U.S. Publication Series: **Research Paper (RP)** Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p. 2004.

FLANNIGAN, M. D; HARRINGTON, B. A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial área burned by wildfire in Canadá (1953-80). Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario, Canada. **American Meteorological Society**.v. 27, p. 441 - 452, 1988.

FOSBERG, M. A. Weather in wildland fire management: The Fire Weather Index. In: Proceedings: Conference on Sierra Nevada Meteorology. **American Meteorological Society**, p 1 - 4, 1978.

FRANCIS, C. F; THORNES, J. B. Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. In 'Vegetation and Erosion'. **Ed. JB Thornes**. Wiley: Chichester, UK. p. 363 - 384, 1990.

GANATSAS, P; ANTONIS, M; MARIANTHI, T. Development of an adapted empirical drought index to the Mediterranean conditions for use in forestry. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 151, p. 241 – 250, 2011.

GILL, A. M; ZYLSTRA, P. Flammability of Australian forests. **Australian Forestry**. v.68 n.2, p. 87 - 93, 2005.

GOLDAMMER, J. G; MUTCH, R. W. **Global forest fire assessment 2000**. Forest Resources Assessment Working Paper 55, Chapter 8. Fires, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 2001.

GOODRICK, S. L. Extension of the Fosberg fire weather index to the impact of precipitation and drought. **Int. J. of Wildland Fire**. v. 11, p. 205 – 211, 2002.

GOULD, J. S; McCAW, W. L; CHENEY, N. P; ELLIS, P. F; KNIGHT, I. K; SULLIVAN, A. L. **Project Vesta. fire in dry eucalypt forest: fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour.** Canberra, Australian Capital Territory and Perth, Western Australia: Ensis-CSIRO and Department of Environment and Conservation, 218 p. 2007.

HOLLIS, J. J; MATTHEWS, S; ANDERSON, W. R; CRUZ, M. G; BURROWS, N.D. Behind the flaming zone: Predicting woody fuel consumption in eucalypt forest fires in southern Australia. **Journal Elsevier B.V. Forest Ecology and Management.** 2011.

HOLSTEN, A; DOMINIC, A. R; COSTA, L; KROPP, J. **Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German federal states.** Forest Ecology and Management. Elsevier v. 287 p 123 – 131, 2013.

IAPAR. **Instituto Agrônômico do Paraná** – disponível em www.iapar.br/ acesso em novembro de 2014.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** – disponível em www.ibge.gov.br/ acesso em 2014.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia** – disponível em www.inmet.gov.br/ acesso em 2012 e 2013

JERVELL, J. T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho dos aerogeradores.** 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2008.

KEANE, R. E; BURGAN, R. E; WAGTENDONK, V. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. **International Journal of Wildland Fire** 10 (3 &4), p 301 – 319. 2001.

KELLER, T. F; ASSAD, E. D; LIMA, P. R. S. R. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. EMBRAPA - **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 311 – 322, 2005.

KONDO, J; KUWAGATA, T. Enhancement of forest fires over northeastern Japan due to atypical strong dry wind. **J. Appl. Meteorol.**, v. 31 n. 4, p. 386 – 396, 1992.

KRASNOW, K; SCHOENNAGEL, T; VEBLEN T. T. Forest fuel mapping and evaluation of LANDFIRE fuel maps in Boulder County, Colorado, USA. **Forest Ecology and Management.** Ed. 07. v. 257, p 1603 - 1612, 2009.

KRAWCHUK, M. A; MORITZ, M. A; PARISIEN, M. A; VAN DORN, J; HAYHOE, K. Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. Jerome Chave, Centre National de la Recherche Scientifique, France, 2009.

KREMENS, R. L; DICKINSON, M. B; BOVA, A. S. Radiant flux density, energy density and fuel consumption in mixed-oak forest surface fires. **International Journal of Wildland Fire** v. 21, p. 722 – 730, 2012.

KRIVTSOV, V; WALKER, S. J. J; STAINES, H.J; WATLING, R; BURT-SMITH, G; GARSIDE, A. Integrative analysis of ecological patterns in an untended temperate

woodland utilising standard and customised software. **Environmental Modelling & Software** v.19, p. 325 – 335, 2009.

LENTILE, L. B. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. **International Journal of Wildland Fire**.v. 15, p. 319 - 345, 2006.

LEONE, V; LOVREGGIO, R; MARTÍN, M. P; MARTÍNEZ, J; VILAR, L. **Human factors off ire occurrence in the Mediterranean**. Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems, p. 149 – 170, 2009.

LEVIN, N; SAARONI Fire Weather in Israel -Synoptic climatological Analysis. **Revista GeoJournal**, v. 47, n. 4, p. 523 - 538. Department of Geography, Tel Aviv University, Ramat Aviv, Tel Aviv Israel, 1999.

LUTES, D. C; KEANE, R. E; CARATTI, J. F. A surface fuel classification for estimating fire effects. **International Journal of Wildland Fire**. v. 18, p. 802 – 814, 2009.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 3. Ed. – Curitiba: Imprensa Oficial, 440p. 2002.

MALCOLM, A. G; ZYLSTRA, P. Flammability of Australian forests. **Flammability of Australian Forestry**. v. 68, n. 2, p. 87 – 93, 2005.

MARTINEZ, J; CHUVIECO, E; MARTIN, P. **Estimation of risk factors of human ignition of fires in Spain by means of logistic regression**. Proceedings of the Second International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: A Global View. General Technical Report. p. 265 – 278, 2004

MARTINEZ, J; VEGA-GARCIA, C; CHUVIECO, E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. **Journal of Environmental Management**. v. 90 p. 1241 – 1252, 2009.

MASELLI, F; RODOLFI, A; BOTTAI, L; ROMANELLI, S; CONESE, C. Classification of Mediterranean vegetation by TM and ancillary data for the evaluation of fire risk. **International Journal of Remote Sensing**. v. 21. Ed. 17, 2000.

MERCER, D. E; PRESTEMON, J. P. Comparing production function models for wildfire risk analysis in the wildland-urban interface. **Forest Policy and Economics**. v. 7, p 782 – 795, 2005.

MILLER, J. D; DANZER, S. R; WATTS, J. M; STONE, S; YOOL, S. R. Cluster analysis of structural stage classes to map wildland fuels in a Madrean ecosystem. **Journal of Environmental Management**. v. 68, p. 239 – 252, 2003.

MINUZZI, R. B; SEDIYAMA, G. C; BARBOSA, E. M; MELO JUNIOR, J. C .F. Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 338 - 344, 2007.

MOENCH, R; FUSARO, J. Soil erosion control after wildfire. University of Colorado, **Fact sheet** n. 6308. Boulder, 2003.

MORANDINI, F; SILVANI, N. V; ROSSI, L; SANTONI, P. A; SIMEONI, A; BALBI, J. H; ROSSI, J. L; MARCELLI, T. Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties. In :**Fire Safety Journal**.v. 41, p. 229 – 235, 2006.

MORENO, J. M; VÁZQUEZ, A; VÉLEZ, R. Recent history of forest fires in Spain. In: **Large Fires**, p. 159 – 185, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 1998.

MORFIN-RÍOS, J. E; JARDEL, P. E. J; ALVARADO, C; MICHEL-FUENTES, J. M. **Caracterización y cuantificación de combustibles forestales**. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara, Primera edición, Guadalajara, Jalisco, México.112p, 2012.

NAVEH, Z. Landscape ecology a bridge between bio-ecology and human ecology. In Cultural aspects of landscape. Ed. H. **Svobodova. Pudoc Wageningen**. p. 45 – 58, 1990.

NIMER, E; Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: **Supren**, 421p.,1979.

NUNES, A; LOURENÇO, L; FERNANDES, S CASTRO, A. C. M. Principais causas dos incêndios florestais em Portugal: Variação espacial no período 2001/2012. Riscos - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança. **Journal territorium**, v. 21, p. 135 – 146, 2014.

NUNES, J. R. S. **FMA⁺, Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o Estado do Paraná, Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

NUNES, J. R. S, SOARES, R. V; BATISTA, A. C. Estimativa da umidade relativa das 13:00 h, com base nos dados das 9:00 h e das 15:00 h, para o estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 35, n. 2 p. 247 – 258, 2005.

NUNES, J. R. S, SOARES, R. V; BATISTA, A. C. **Manual de prevenção e combate a incêndios florestais 2ª edição**. Editado pelos autores, Curitiba. 2008.

NUNES, J. R. S; SOARES, R. V; BATISTA, A. C. Ajuste da fórmula de monte alegre alterada (FMA⁺) para o estado do Paraná. **Revista Floresta**, v.37 p. 1 – 14, 2007.

NUNES, J. R. S; SOARES, R. V; BATISTA, A. C. FMA⁺ um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 36, p. 75 – 91, 2006.

OTTMAR, R. D; SANDBERG, D. V; RICCARDI, C. L; PRICHARD, S. J. An overview of the fuel characteristic classification system - Quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37 n. 12, p. 2383 – 2393, 2007.

PACHECO, M. R. P. S; MARCONDES-HELENE, M. E. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Revista Estudos Avançados**. v. 4, n. 9 (IEA), USP, São Paulo, 1990.

PASTOR, E; ZÁRATE, L; PLANAS, E; ARNALDOS, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire Behavior. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, n. 2, p. 139 – 153, 2003.

PEREIRA, J. F. **Variação da umidade dos combustíveis florestais em função dos índices de perigo de incêndios FMA e FMA⁺ em um povoamento de *Pinus elliottii* no município de Rio Negro - PR.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PEREIRA, L. M .P; CARAMORI, P.H; RICCE, W.S; SILVA, D. A. B; CAVIGLIONE, J. H. Determinação do início e término da estação chuvosa no estado do Paraná. **Revista Geografar** (UFPR). v.03, p. 01-12, 2008.

PÉREZ, Y; PASTOR, E; AGUEDA, A; PLANAS, E. Effect of Wind and Slope When Scaling the Forest Fires Rate of Spread of Laboratory Experiments. **Journal Fire Technology**. v. 47, Issue 2 , p. 475 – 489, 2011.

PICOLO, A. P; RÜHLER, A. J; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Rev. Bras. Ensino Fís.** v. 36, n. 4, São Paulo, 2014.

PYNE, S. J. Fire and Life. In: PYNE. S. J. Introduction to wildland fire: Fire Management in the United States. USA: Wiley - **Interscience**, p. 177 – 200, 1984.

PYNE, S. J; ANDREWS, P. L; LAVEN, R. D. 1996, Introduction to wildland fire, 2. ed., New York, NY: John Wiley & Sons. 808p. 1996.

QUADROS, M. F. L; MACHADO, L. H; CALBETE, S; BATISTA N. M; OLIVEIRA G. S; **Climatologia, precipitação e temperatura** CPTEC/INPE disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/> acessado em setembro de 2014.

RAMOS, C; VENTURA, J. E. Um índice climático de perigo de incêndios aplicado aos fogos florestais em Portugal. **Finisterra**, v. 27, n. 53 - 54, p. 79 – 93, 1992.

REGO, F. C, BOTELHO, H.S; BUNTING, S. Efeito do fogo controlado no crescimento de *Pinus pinaster* no norte de Portugal. In Simpósio sobre "A Floresta e o Ordenamento do Espaço de Montanha", **Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais**, UTAD, Vila Real, 1988.

REGO, F. C; BOTELHO, H. S. Técnica do fogo controlado. UTAD Vila Real Portugal. CIFAP – Ciências Florestais Arquitetura Paisagista, **Department of Forest & Landscape** Alto Douro. 124 p. 1990.

RIBEIRO, G. A. **Estudo do comportamento do fogo e de alguns efeitos da queima controlada em povoamentos de *Eucalyptus viminalis* Labill em três Barras, Santa Catarina.** 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1997.

RIBEIRO; G. A; SOARES, R. V. Estudo do Comportamento do Fogo em Queimas Controladas em Povoamentos de *Eucalyptus viminalis*. Sociedade de investigações

florestais. Universidade Federal de Viçosa, MG. **Revista Árvore**. v. 23, número 1, p. 57 – 64, 1999.

RIZZINI, C. T. **Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos**. São Paulo HUCITEC, EDUSP. Fogo: p. 87 – 111, 1976.

ROTHERMEL, R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Department of Agriculture, **Intermountain Forest and Range Experiment Station**. 40p. 1972.

ROVIRA, P; VALLEJO, V. R. Organic carbon and nitrogen mineralization under Mediterranean climatic conditions the effects of incubation depth. **Soil Biol. Biochem.** v. 29. n. 9110, p. 1509 - 1520. Elsevier Science Ltd. All rights reserved Printed in Great Britain, 1997.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J; CAMIA, A. Forest fires at a glance: facts, figures and trends. In the EU. In BIROT, Y. Living with wildfires: what science can tell us – A contribution to the Science – Policy Dialogue. **European Forest Institute**, v. 15 p 11 – 18, 2009.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J; SCHULTE, E; SCHMUCK, G; CAMIA, A. The European Forest Fire Information System in the context of environmental policies of the European Union. **Forest Policy and Economics**, v. 29, p. 19 – 25, 2013.

SANTONI, P. A; SIMEONI, A; ROSSI, J. L.; BOSSEUR, F., MORANDINI, F.; SILVANI, X.; BALDI, J. H.; CANCELLIERI, D; ROSSI, L. Instrumentation of wildland fire: Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub. **Fire Safety Journal**, Ed. elsevier v. 41 p. 171 – 184. Université de Corse, Campus Grossetti, France, 2006.

SCHROEDER, M. J; BUCK, C. C. Fire weather, a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. **USDA Forest Service**, Agriculture Handbook Washington D. C: Govt. Printing Office. 229 p. 1970.

SCOTT, J. H. Introduction to Wildfire Behavior Modeling. National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer. Available: Integrating science, technology and fire management. **Wildland fire management RD&A**. 149 p. 2012.

SCOTT, J. Review and assessment of LANDFIRE canopy fuel mapping procedures. p.1-21. 2008.

SHADLOUEI, A. J; DELAVAR, M.R. The zoning of forest fire potential of Gulestan Province forests using granular computing and MODIS images. **International Archives of the Photogrammetry**, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W3, p 365 - 370. Tehran, Iran, 2013.

SHARPLES, J. J; McRAE, R. H. D.; WEBER, R. O.; GILL, A. M. A simple index for assessing fuel moisture content. **Environmental Modelling and Software**. v. 24, p. 637 – 646, 2008.

SILVA, I. D. B; PONTES, A. C. F. J. Elaboração de um Fator de Risco de Incêndios Florestais utilizando Lógica Fuzzy. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFAC – Rio Branco/AC. **Revista Biomatemática**. IMECC – UNICAMP v. 21 p 113 – 128, 2011.

SANTONI, P. A; SIMEONI, A; ROSSI, J. S; BOSSEUR, F. MORANDINI, F; SILVANI, X. Instrumentation of wildland fire: characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub. **Fire Safety Journal** 41 (3), p. 171 - 184, 2006.

SLETNES, A. I. **Assessment of forest fire risks and innovative strategies for fire prevention**. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe FOREST EUROPE LIAISON UNIT OSLO. Rhodes, Greece, 2010.

SOARES, R. V. Comparação entre quatro índices na determinação do grau de perigo de incêndios no município de Rio Branco do Sul - PR. **Revista Floresta**. v.17, n.1 e 2, p 31 – 35. Curitiba, 1987.

SOARES, R. V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF. 213p. 1985.

SOARES, R. V. **Prevenção e controle de incêndios florestais**. ABEAS, 120 p. 1984.

SOARES, R. V. Desempenho da “Fórmula de Monte Alegre” índice brasileiro de perigo de incêndios florestais. **Revista Cerne**, v. 4, n. 1, p. 087 - 099, 1998.

SOARES, R. V; BATISTA, A.C. **Incêndios florestais controle efeitos e uso do fogo**. Curitiba. 264p. 2007.

SOARES, R. V; BATISTA, A. C. **Meteorologia e Climatologia Florestal**. Editora(s): Edição: 1. Produção Independente, 195p. 2004.

SOARES, R. V; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 17, n. 1/2, p. 73 - 94, 1987.

SOARES, R. V; BATISTA, A. C. **Controle de incêndios florestais. Módulo 3, Comportamento do fogo**. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior – ABEAS Brasília – DF 2003.

SOARES, R. V; BATISTA, A. C; NUNES, J. R. S. **Manual de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais** 2. Ed. Curitiba. 60p. 2008.

SOARES, R. V; SANTOS, J. F. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 219 – 225, 2002.

SOUZA, D. M; CARFAN, A.C; NERY, J. T. Análise da Temperatura e de Fluxos de Calor no Município de Ourinhos, utilizando o Modelo ENVI-met. **Revista Geonorte**, v. 2, n.4, p. 723 - 733, Manaus - AM, Brasil, 2012.

SOUZA, E. B; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Revista Climanalise**. 2 Ed. 2003. Publicação on-line disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/revista/> acessado em setembro de 2014.

SOUZA, L. J. B. **Secagem de material combustível em plantações de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

SOUZA, L. J. B; SOARES, R. V; BATISTA, A. C. Modelagem do material combustível em plantações de *Pinus taeda* no norte de Santa Catarina. FUPEF, **Revista Floresta**, v.33 n. 3, p. 157 – 168 Curitiba-PR, 2003.

STEPHENS, S. L; MOGHADDAS, J. J. Silvicultural and reserve impacts on potential fire behavior and forest conservation: Twenty-five years of experience from Sierra Nevada mixed conifer forests. **Elsevier Biological Conservation**. v. 125, p. 369 – 379, 2005.

SULLIVAN, A; KNIGHT, I; WEBER, R; FINNIGAN, J. Application of complex systems science to the analysis of bushfires: A scoping study. **CSIRO Forestry and Forest Products Client Report**, n.1393, 50p. 2003

TIHAY, V; SIMEONI, A; SANTONI, P. A; ROSSI, L. Computational and experimental study of laminar flames from forest fuels. **First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area**, v. 1 and 2. New York: p. 1 – 5, 2006.

TORRES, F. T. P. Relações entre fatores climáticos e ocorrências de incêndios florestais na cidade de Juiz de Fora, MG. **Revista on line Caminhos de Geografia**. v. 7 n. 18 p.162 – 171, 2002 acessado em 2013.

TREVISAN, E. **Classificação e caracterização de horizontes orgânicos sob povoamentos de *Pinus taeda* L na região de Ponta Grossa - PR**. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 1992.

VAN WAGNER, C. E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. **Petawawa National Forestry Institute**, Chalk River, Ontario. Canadá. 37p. 1987.

VAN WAGNER, C. E; PICKETT, T. L. Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system. Canadian Forestry Service, **Forestry Technical Report**. Chalk River (Ontario). v.33. 18p. 1985.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Versão digital 2 disponível em www.ikat.ufal.br. Recife, 2006. 449p. Acessado em novembro de 2014.

VEGA, J. A. FERNANDES, P. M; CUIÑAS, P; FONTURBEL, T; PÉREZ, J. R; LOURENÇO, C. Fire spread analysis of early summer field experiments in shrubland fuel types of Northwestern Iberia. In: VIEGAS, D. X., (Ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOREST FIRE RESEARCH, 5., 2006, Figueira da Foz. **Proceedings...** Coimbra: University of Coimbra, 191p. 2006

VEGA-GARCIA, C; WOODARD, P.M. Geographic and temporal factors that seem to explain human-caused fire occurrence in Withecourt Forest Alberta. **Publications Northern Forestry Centre** En: Proceedings of GIS'93 Symposium, Vancouver, British Columbia. 1993.

VOSGERAU, J. L; BATISTA, A. C; SOARES, R. V; GRODZKI, L. Avaliação dos registros de incêndios florestais do estado do Paraná no período de 1991 a 2001. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 23 - 32, 2006.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 346 p. 1995.

WOTTON, B. M; GOULD, J. S; MCCAWE, W. L; CHENEY, N. P; TAYLOR, S. W. Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. Canadian Forest Service Publications. **International Journal of Wildland Fire**. v. 21 p 270 – 281, 2012.

WU, Z. W; HE, H. S; CHANG, Y; LIU, Z. H; CHEN, H. W. **Development of Customized Fire Behavior Fuel Models for Boreal Forests of Northeastern China**. Springer Science. Business Media, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE 01 –	Formulário de queima prescrita.....	95
APÊNDICE 02 –	Formulário de secagem de material combustível.....	96
APÊNDICE 03 –	Análise de variância e teste SNK (<i>Student-Newman-Keuls</i>) para a temperatura em função da FMA ⁺ e da idade dos povoamentos..	97
APÊNDICE 04 –	Análise de variância e teste SNK (<i>Student-Newman-Keuls</i>) para a velocidade do vento (m.s ⁻¹) em função da FMA ⁺	98
APÊNDICE 05 –	Análise de variância e teste SNK para a umidade relativa do ar em função da FMA ⁺	99
APÊNDICE 06 –	Análise de variância e teste SNK para consumo de material combustível fino em função da idade e da FMA ⁺	100
APÊNDICE 07 –	Teste SNK para o consumo de material combustível da classe LB em função da idade e da FMA ⁺	101
APÊNDICE 08 –	Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa da velocidade de propagação do fogo.....	102
APÊNDICE 09 –	Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa do comprimento de chamas.....	103
APÊNDICE 10 –	Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa da intensidade do fogo.....	104

APÊNDICE 01. Formulário de queima prescrita

DATA ___/___/___ RESPONSÁVEL_____

TRATAMENTO_____

NÚMERO DA PARCELA

Estação portátil	INICIAL	FINAL
Vel. VENTO		
UR %		
TEMPERATURA		

DISTÂNCIAS (m)	TEMPO	Comprimento de chamas	VENTO (anemômetro)	Obs:
0 – 1				Sentido predominante do vento durante a queima prescrita <input type="text"/>
1 – 2				
2 – 3				
3 – 4				
4 – 5				
5 – 6				
6 – 7				
7 – 8				
8 – 9				
9 – 10				

AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

AMOSTRA	Classes material combustível	ANTES da queima		DEPOIS da queima	
		massa	espessura	massa	espessura
1	Ln1				
	Ln2				
	Lv				
	LB				
AMOSTRA	Classes material	massa	espessura	massa	espessura
2	Ln1				
	Ln2				
	Lv				
	LB				
AMOSTRA	Classes material	massa	espessura	massa	espessura
3	Ln1				
	Ln2				
	Lv				
	LB				

APÊNDICE 02. Formulário de secagem de material combustível

DATA ___/___/___ RESPONSÁVEL_____

TRATAMENTO_____

AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

NÚMERO DA PARCELA

AMOSTRA	Classes de combustível	Massa seca (antes da queima)	Massa seca (após a queima)
1	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		
AMOSTRA	Classes de combustível		
2	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		
AMOSTRA	Classes de combustível		
3	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		

NÚMERO DA PARCELA

AMOSTRA	Classes combustível	Massa seca (antes da queima)	Massa seca (após a queima)
1	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		
AMOSTRA	Classes de combustível		
2	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		
AMOSTRA	Classes de combustível		
3	Ln1		
	Ln2		
	Lv		
	LB		

APÊNDICE 03. Análise de variância e teste SNK (*Student-Newman-Keuls*) para a temperatura em função da FMA⁺ e da idade dos povoamentos

TABELA 1 – Análise de variância da temperatura do ar registrada no campo durante a queima das parcelas

F. Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	Nível de Significância
Principais efeitos					
A: Idade	50,9076	2	25,4538	7,18	0,0011*
B: Tqueima	0,307065	1	0,307065	0,09	0,7690
C: GPerigo	741,362	4	185,34	52,26	0,0000**
Resíduos	503,558	142	3,54619		
TOTAL	1302,43	149			

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Teste SNK para a idade dos povoamentos

IDADES (anos)	N	Média –T (°C)	GRUPOS HOMOGÊNIOS
8	52	23,7018	X
11	50	23,8158	X
5	48	25,0064	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 3 – Teste SNK para os graus de perigo de incêndios

GRAUS DE PERIGO	N	Média –T (°C)	GRUPOS HOMOGÊNIOS
Pequeno	30	20,5961	X
Nulo	30	23,487	X
Alto	30	24,1836	X
Médio	30	25,2033	X
Muito alto	30	27,4033	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 04. Análise de variância e teste SNK (*Student-Newman-Keuls*) para a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) em função da FMA⁺

TABELA 1 – Análise de variância da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) registrada no campo durante a queima das parcelas

F. Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	Nível de Significância
Principais efeitos					
A: Idade	0,028802	2	0,0144009	0,23	0,7932
B: Tqueima	0,297783	1	0,297783	4,80	0,0301
C: GPerigo	4,682040	4	1,17051	18,86	0,0000
Resíduos	8,813240	142	0,062065		
TOTAL	13,89320	149			

NOTA: *significativo ao nível de 95%
Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Teste SNK para os graus de perigo de incêndios

GRAUS DE PERIGO	N	Média –m/s	GRUPOS HOMOGÊNIOS
Nulo	30	-0,00143712	X
Pequeno	30	0,165968	X
Alto	30	0,407016	X
Muito alto	30	0,432	X
Médio	30	0,44	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%
Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 05. Análise de variância e teste SNK para a umidade relativa do ar em função da FMA⁺

TABELA 1 – Análise de variância da umidade relativa do ar (UR%) registrada no campo durante a queima das parcelas.

F. Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	Nível de Significância
Principais efeitos					
A: Idade	224,061	2	112,03	1,30	0,2748
B: Tempo de queima	47,3067	1	47,3067	0,55	0,4593
C: Grau de Perigo	7844,26	4	1961,07	22,82	0,0000
Resíduos	12203,0	142	85,9365		
TOTAL	20360,7	149			

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Teste SNK para os graus de perigo de incêndios

GRAUS DE PERIGO	N	Média - %	GRUPOS HOMOGÊNIOS
Muito Alto	30	46,11	X
Alto	30	50,7709	XX
Médio	30	54,8633	XX
Pequeno	30	58,1448	X
Nulo	30	67,5184	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 06. Análise de variância e teste SNK para consumo de material combustível fino em função da idade e da FMA⁺

TABELA 1 – Análise de variância do material combustível consumido das classes Ln1; Ln2 e Lv

F. Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	Nível de Significância
Principais efeitos					
A: Idade	1612,31	2	806,153	3,78	0,0251
B: Tempo de queima	539,265	1	539,265	2,53	0,1138
C: Grau de Perigo	70204,3	4	17551,1	82,38	0,0000
Resíduos	30252,7	142	213,047		
TOTAL	102002,	149			

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Teste SNK para o material combustível consumido pelo fogo das classes Ln1; Ln2 e Lv em função da idade dos povoamentos

IDADES (anos)	N	Média Kg/m ²	GRUPOS HOMOGÊNIOS
11	50	0,2608	X
5	48	0,3135	XX
8	52	0,3487	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 3 – Teste SNK para o material combustível consumido pelo fogo das classes Ln1; Ln2 e Lv em função dos graus de perigo FMA⁺

GRAUS DE PERIGO	N	Média Kg/m ²	GRUPOS HOMOGÊNIOS
Nulo	30	0,00	X
Pequeno	30	0,1239	X
Médio	30	0,2601	X
Alto	30	0,5037	X
Muito alto	30	0,6529	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 07. Teste SNK para o consumo de material combustível da classe LB em função da idade e da FMA⁺

TABELA 1 – Teste SNK para o combustível consumido pelo fogo da classe LB em função da idade dos povoamentos

IDADES (anos)	N	Média kg.m ⁻²	GRUPOS HOMOGÊNIOS
11	50	-0,0208	X
8	52	0,0003	X
5	48	0,0630	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Teste SNK para o combustível consumido pelo fogo da classe LB em função dos graus de perigo FMA⁺

GRAUS DE PERIGO	N	Média kg.m ⁻²	GRUPOS HOMOGÊNIOS
Pequeno	30	-0,01496	X
Médio	30	-0,00481	X
Nulo	30	0,004184	X
Muito Alto	30	0,022984	XX
Alto	30	0,063564	X

NOTA: *significativo ao nível de 95%

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 08. Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa da velocidade de propagação do fogo

TABELA 1 – Parâmetros estatísticos para as equações de estimativa da velocidade de propagação do fogo.

MODELO	R	R ²	R ² _{ajustado}	S _{yx}	S _{yx} %
1	0,963	0,928	0,921	0,019837	33,76
2	0,963	0,927	0,921	0,019885	33,85
3	0,963	0,928	0,921	0,019907	33,88
4	0,963	0,928	0,920	0,019978	34,01

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Coeficientes das equações de estimativa da velocidade de propagação do fogo

COEFICIENTES	MODELOS			
	1	2	3	4
b_0	0,17134472	0,14595795	0,17267650	0,16419832
b_1	-0,02689890	-0,02077755	-0,02710916	-0,02526541
b_2	0,00253405	0,00262594	0,00256489	0,00256363
b_3	0,00235066	0,00231600	0,00235343	0,00234594
b_4	-0,04645252	-0,05149630	-0,04639132	-0,04590431
b_5	-0,00003024	-0,00002856	0,00498295	0,00563981
b_6	-0,00004116	-0,00004338	-0,00003045	-0,00002995
b_7	-0,01462330	-0,01411004	-0,00004181	0,00001339
b_8	0,00021854	0,00019655	-0,01440933	-0,00004187
b_9	-0,00114045	-0,00131851	0,00021854	-0,01418553
b_{10}	0,01724623	0,00739809	-0,00113500	0,00021299
b_{11}	0,00657633	0,00619045	0,01637860	-0,00119437
b_{12}	0,00532278	--	0,00657641	0,01706069
b_{13}	--	--	0,00511584	0,00650850
b_{14}	--	--	--	0,00497501

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 09. Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa do comprimento de chamadas

TABELA 1 – Parâmetros estatísticos para as equações de estimativa do comprimento de chamadas

Modelo	R	R ²	R ² _{ajustado}	S _{yx}	S _{yx} %
1	0,975	0,950	0,943	7,933	22,859
2	0,975	0,951	0,943	7,944	22,891
3	0,974	0,949	0,942	7,977	22,986
4	0,974	0,949	0,942	7,995	23,038

Fonte: autor (2015).

TABELA 2 – Coeficientes das equações de estimativa do comprimento de chama

COEFICIENTES	MODELOS			
	1	2	3	4
<i>b</i> ₀	-2.863,708	-2.922,648	-2.286,921	-2.179,051
<i>b</i> ₁	273,629	290,458	167,864	115,405
<i>b</i> ₂	0,018	0,024	0,019	0,018
<i>b</i> ₃	-24,994	-24,650	-23,986	-27,826
<i>b</i> ₄	-2,388	-2,364	-2,196	-2,129
<i>b</i> ₅	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
<i>b</i> ₆	35,421	32,392	39,645	40,124
<i>b</i> ₇	445,057	459,896	353,986	338,747
<i>b</i> ₈	497,682	499,756	408,157	388,363
<i>b</i> ₉	-2,309	-2,126	-2,379	-2,345
<i>b</i> ₁₀	-10,052	-10,594	-12,345	-11,757
<i>b</i> ₁₁	-0,317	-0,021	-0,285	-0,264
<i>b</i> ₁₂	20,484	-0,324	24,276	25,085
<i>b</i> ₁₃	-7,259	19,183	-8,978	-9,484
<i>b</i> ₁₄	1,084	-6,623	1,218	1,268
<i>b</i> ₁₅	-1,376	1,018	-1,919	-0,300
<i>b</i> ₁₆	-3,942	-1,449	-0,312	0,299
<i>b</i> ₁₇	-0,370	-4,216	0,299	1,977
<i>b</i> ₁₈	0,316	-0,372	2,042	--
<i>b</i> ₁₉	2,223	0,306	--	--
<i>b</i> ₂₀	--	2,239	--	--

Fonte: Autor (2015)

APÊNDICE 10. Parâmetros estatísticos e coeficientes para estimativa da intensidade do fogo

TABELA 1 – Parâmetros estatísticos para as equações de estimativa da intensidade do fogo

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Syx	Syx%
1	0,941	0,885	0,874	97,210	36,34
2	0,939	0,881	0,873	97,629	36,36
3	0,940	0,883	0,873	97,314	36,38
4	0,940	0,883	0,873	97,540	36,46

Fonte: Autor (2015)

TABELA 2 – Coeficientes das equações de estimativa da intensidade do fogo

COEFICIENTES	MODELOS			
	1	2	3	4
b0	4.138,948	3.210,837	4.388,350	4.379,962
b1	2.092,535	524,996	1.862,609	1.920,321
b2	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002
b3	0,046	0,028	0,044	0,045
b4	-8,649	-3,834	-4,280	-4,082
b5	-0,005	-833,902	-893,153	-0,001
b6	-690,367	-667,160	-1.098,188	-864,032
b7	-1.132,389	1,611	1,746	-1.118,325
b8	1,313	6,737	6,922	1,694
b9	6,746	-7,626	-14,466	6,949
b10	-16,309	0,149	-39,202	-15,782
b11	-43,975		0,166	-39,311
b12	0,136			0,177
b13	4,690			

Fonte: Autor (2015)