

PREDIÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO DE INCÊNDIO E MODELAGEM
COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DO AVANÇO DA FRENTE DO
FOGO NO PARQUE NACIONAL DA FLORESTA DA TIJUCA

Vania Resende Carapiá

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Prof. Gutemberg Borges França, Ph.D.

Prof. José Ricardo de Almeida França, D.Sc.

Dr. Manoel do Couto Fernandes, D.Sc.

Dr. Reinaldo Bomfim da Silveira, Ph.D.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

CARAPIÁ, VANIA RESENDE

Predição do Índice de Risco de Incêndio e
Modelagem Computacional do Comportamen-
to do Avanço da Frente do Fogo no Parque
Nacional da Floresta da Tijuca

[Rio de Janeiro] 2006

XX, 197 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Civil, 2006)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Índice de Risco de Fogo
2. Incêndios Florestais
3. Simulação Computacional

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PREDIÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO DE INCÊNDIO E MODELAGEM
COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DO AVANÇO DA FRENTE DO
FOGO NO PARQUE NACIONAL DA FLORESTA DA TIJUCA

Vania Resende Carapiá

Março/2006

Orientadores: Luiz Landau

Gutemberg Borges França

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma metodologia de estimativa de risco de incêndio para o Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca), na cidade do Rio de Janeiro. Para tal, são testados índices de risco de incêndio para a área em estudo. Os valores de diagnósticos do risco são determinados utilizando medidas *in situ* das condições atmosféricas e do estado da vegetação, obtidas por duas plataformas de coleta de dados (PCD) instaladas na área. Os índices são correlacionados com os eventos de focos de fogo e as variáveis meteorológicas coletadas nos setores do Horto e do Sumaré, respectivamente, no período 2003 e 2004. Os cenários de fonte de fogo são construídos com base na integração dos valores dos índices de risco de incêndio, dados meteorológicos *in situ*, cobertura vegetal e topografia. A partir desses cenários, é realizada a modelagem computacional do comportamento do avanço da frente de fogo para o PARNA-Tijuca, utilizando o FARSITE, um programa de simulação do fogo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PREDICTION OF FIRE RISK INDEX AND COMPUTATIONAL MODELING OF
THE FIRE FRONT GROWTH BEHAVIOR AT PARQUE NACIONAL DA
FLORESTA DA TIJUCA

Vania Resende Carapiá

March/2006

Advisors: Luiz Landau

Gutemberg Borges França

Department: Civil Engineering

This work presents a methodology for estimation of fire risk for the *Parque Nacional da Tijuca* (PARNA-Tijuca), in the city of Rio de Janeiro. Therefore, indexes of fire risk are tested for the area in study. The fire risk index diagnostic values are calculated using *in situ* measurements of the state of the vegetation and meteorological information, collected by two automatic data collection platforms (DCP) installed in the study area. The indexes are correlated with the events of fire focuses and the meteorological variables collected in the sections of Horto and of Sumaré, respectively, in the period 2003 and 2004. The sceneries of fire front are built with relation to integration of the values of the indexes of fire risk, meteorological data, land cover and use and topography. Based on, these sceneries, a computacional modelling of fire front growth behavior is performed for PARNA-Tijuca and using FARSITE, which is a fire simulation program.

Dedico esta tese à memória de minha mãe Albina e meu pai Floriano, por todo incentivo, amor e carinho que me deram ao longo dos anos e pelo exemplo de caráter, dignidade e sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores professores Dr. Gutemberg Borges França e Dr. Luiz Landau, pela orientação, confiança, apoio e reflexões críticas para que este trabalho pudesse se realizar.

Ao meu marido Giancarlo Cordeiro da Costa, pelo amor, compreensão, paciência e por estar em todos os momentos ao meu lado. E, pela ajuda, incentivo e sugestões em diversas fases deste trabalho.

Aos meus irmãos e sobrinhos, Antônio, Sergio, Sandro, Carol, Júlia, Gustavo, Lucca e Bernardo pelo carinho e amizade.

À minha família e a família de meu marido pela amizade e apoio constante.

Às muitas pessoas que colaboraram para que este trabalho fosse concluído, a maioria delas de forma indireta, por meio da troca de experiência, incentivo, confiança e aprendizado tanto técnico quanto humano; e, especialmente, aos amigos Marcela, Luciana, Claudinha, Márcia Verônica, Paulo, Manoel, Michele, Roselene, Maria Inês, Márcia Verônica, Patrícia, e Stella.

Ao pessoal administrativo do Laboratório de Informática (B 103) e do departamento de meteorologia.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

INDÍCE

Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Símbolos.....	xvi
CAPÍTULO 1 - Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 - Índice de Risco de Incêndio.....	6
2.1 – Introdução.....	6
2.2 – Revisão Bibliográfica.....	7
2.3 – Índice de Risco de Incêndios.....	13
2.3.1 – Sistema Nacional de Índice de Risco de Incêndio Americano.....	13
2.3.1.1 - Umidade do Material Combustível Morto.....	16
• Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 1-hora (MC1).....	17
• Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 1-hora (MC10).....	18
• Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 1-hora (MC100).....	20
• Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 1-hora (MC1000).....	21
2.3.1.2 - Umidade do Material Combustível Vivo.....	21
• Modelo de Umidade do Material Combustível Herbáceo.....	23
• Modelo de Umidade do Material Combustível Lenhoso.....	26
2.3.1.3 - Propriedades Físicas e Químicas da Partícula do Combustível.....	27
• Densidade do material combustível.....	28
• Conteúdo mineral total do material combustível.....	29
• Conteúdo mineral efetivo do material combustível.....	29
• Conteúdo de calor.....	29

• Razão da área da superfície da partícula do combustível pelo volume.	30
• Umidade extinta do combustível.....	31
2.3.1.4 – Componentes e Índices do Comportamento do Fogo.....	32
• Componente de Propagação.....	32
• Componente de Energia Liberada.....	32
• Componente de Ignição.....	33
• Índice de Queima.....	35
• Índice de Incêndio por Causa Antrópica e por Descarga Elétrica.....	36
• Índice de Resistência ao Fogo.....	36
2.3.2 – Índice de Risco de Incêndios no Canadá.....	37
2.3.3 – Índice de Risco de Incêndios de Monte Alegre.....	38
2.3.4 – Índice de Risco de Incêndios de Angstron.....	39
2.3.5 – Índice de Risco de Incêndios de Nesterov.....	40
2.4 – Materiais e Métodos.....	41
2.4.1 – Área de Estudo.....	41
2.4.2 – Materiais.....	43
2.4.2.1 – Coleta de Dados.....	43
2.4.3 – Método.....	46
2.4.3.1 – Determinação dos Índices de Risco de Incêndio.....	47
2.5 – Análise dos Resultados.....	50
2.5.1 – Índice de Resistência do Fogo (<i>IRF</i>) e Dados de Focos de Fogo.....	50
2.5.2 – Índice de Monte Alegre (<i>FMA</i>) e Dados de Focos de Fogo.....	54
2.5.3 – Índice de Resistência do Fogo (<i>IRF</i>) e Variáveis Meteorológicas....	57
2.5.4 – Índice de Resistência do Fogo (<i>IRF</i>) e Umidade do Material Combustível.....	58
2.5.5 – Variáveis Meteorológicas e Índices de Risco de Incêndio.....	60

CAPÍTULO 3 - Modelagem Computacional do Avanço da Frente do

Fogo.....	66
3.1 – Introdução.....	66
3.2 – Revisão Bibliográfica.....	68
3.3 – FARSITE: Simulador Computacional do Avanço da Frente de Fogo.....	75
3.3.1 – Modelo de RICHARDS.....	76

3.3.2 – Transformação da Inclinação do Terreno.....	84
3.3.3 – Efeitos do Vento e Topografia.....	85
3.3.4 – Dimensões da Elipse.....	86
3.3.5 – Modelos de Comportamento de Incêndio.....	88
3.3.5.1 – Incêndio de Superfície.....	88
3.3.5.2 – Incêndio de Copa.....	88
3.3.5.3 – Aceleração do Incêndio.....	90
3.3.5.4 - Umidade do Combustível.....	91
3.4 – Sistemas de Informação Geográfica.....	92
3.5 – Materiais e Métodos.....	93
3.5.1 – Materiais.....	93
3.5.1.1 – Preparação dos Dados.....	93
3.5.2 – Método.....	94
3.5.2.1 – Dados de Entrada do FARSITE.....	94
3.5.2.2 – Definição dos Modelos de Combustível para Representar a Paisagem.....	97
3.5.2.3 – Processamento dos Dados Meteorológicos.....	101
3.5.2.4 – Definição dos Pontos de Ignição.....	101
3.5.2.5 – Estabelecimento das Condições para a Simulação.....	102
3.6 – Construção de Cenários de Frente de Fogo para o PARNA-Tijuca.....	103
3.6.1 – Análises da Distribuição da Intensidade e Direção do Vento na PARNA-Tijuca.....	103
3.6.2 – Análise de Sensibilidade do FARSITE.....	105
3.6.3 – Ajuste do FARSITE com Resultado Experimental.....	108
3.6.4 – Cenários de Frente de Fogo na Floresta da Tijuca.....	110
CAPÍTULO 4 - Conclusões e Propostas Futuras.....	134
Referências Bibliográficas.....	140
ANEXO I.....	155
ANEXO II.....	175
ANEXO III.....	176

Lista de Figuras

Figura 2.1: Estrutura do Sistema Nacional de Índice de Risco de Incêndio (NFDRS). O índice de resistência do incêndio- <i>IRF</i> (<i>Fire Load Index</i>) como resultado final do sistema.....	15
Figura 2.2: Mapa de localização dos sub-sistemas hidrográficos do maciço da Tijuca, divididos em cinco sub-sistemas, conforme a legenda.....	42
Figura 2.3: Os pontos representam a localização das PCD's nos setores do Horto e do Sumaré, respectivamente, dentro da área urbana da cidade do Rio de Janeiro.....	44
Figura 2.4: (a) Torre 56-TSU-JP localizada no Horto; (b) Torre 02-Ramal Jardim Botânico localizado no Sumaré; (c) Plataforma de coleta de dados instalado na torre da Light a uma altura em torno de 4 metros e (d) Disposição do sensor de temperatura e umidade do combustível instalado na torre da Light no Sumaré.....	45
Figura 2.5: Fluxograma do procedimento para obtenção do risco de Incêndio.....	46
Figura 2.6: Variação horária do <i>IRF</i> nas áreas do Sumaré e Horto no período de 153 horas em julho de 2003.....	51
Figura 2.7: Variação diária do FMA e precipitação com dados coletados no setor do Sumaré e Horto no período de junho e julho de 2003.....	57
Figura 2.8: Variação horária do <i>IRF</i> temperatura e umidade relativa com dados coletados no setor do Sumaré no período de 220 horas em julho de 2003.....	58
Figura 2.9: Variação horária do índice <i>IRF</i> e umidade relativa do ar e a umidade do combustível com dados coletados no setor do Sumaré no período de 220 horas em julho de 2003.....	59
Figura 2.10: Variação horária do índice <i>IRF</i> e umidade relativa do ar e a umidade do combustível com dados coletados no setor do Horto no período de 220 horas em julho de 2003.....	59
Figura 2.11: Comparação da variação diária dos índices <i>FMA</i> , <i>Ang</i> , <i>IRF</i> e <i>FWI</i> dos dados coletados no setor do Sumaré no mês de julho e agosto de 2003.	61
Figura 2.12: Variação diária da temperatura, umidade relativa e precipitação dos dados coletados no setor do Sumaré no mês de julho e agosto de 2003.....	62
Figura 2.13: Comparação da variação diária dos índices <i>FMA</i> , <i>Ang</i> , <i>IRF</i> e <i>FWI</i> dos dados coletados no setor do Horto no mês de julho e agosto de 2003.....	62
Figura 2.14: Variação diária da temperatura, umidade relativa e precipitação dos	

dados coletados no setor do Horto no mês de julho e agosto de 2003.....	63
Figura 3.1: Princípio de Huygens usando uma série elíptica.....	77
Figura 3.2: Frente do incêndio no tempo t com vento constante na direção y	77
Figura 3.3: Envelope das elipses formando a frente de incêndio no tempo $t+dt$	78
Figura 3.4: Frente do fogo transformada em círculo para o ponto s e $s+ds$	80
Figura 3.5: Fluxograma do processo de execução do FARSITE.....	94
Figura 3.6: Mapa de elevação do terreno (m) do maciço da Tijuca/RJ.....	96
Figura 3.7: Mapa de inclinação do terreno ($^{\circ}$) do maciço da Tijuca/RJ.....	96
Figura 3.8: Mapa da orientação da encosta ($^{\circ}$) do maciço da Tijuca/RJ.....	97
Figura 3.9: Mapa de uso e cobertura do solo do maciço da Tijuca/RJ.....	98
Figura 3.10: Mapa do modelo de combustível.....	99
Figura 3.11: Mapa de percentagem de cobertura.....	99
Figura 3.12: Localização dos pontos de ignição.....	102
Figura 3.13: (a)-(b) Intensidade e direção do vento na estação do Sumaré para o mês de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.....	104
Figura 3.14: (a)-(b) Intensidade e direção do vento na estação do Horto para o mês de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.....	104
Figura 3.15: (a) Fogo de 6 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação com vento de 3 m/s com predominância da direção oeste e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação de calmaria e sem declive.....	106
Figura 3.16: (a) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação com vento de 3 m/s com predominância da direção oeste e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia) em uma situação sem vento e sem declive.....	107
Figura 3.17: (a) Fogo de 4 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia) em uma situação com vento de 5m/s com predominância do vento Norte e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia.) em uma situação com vento de 5 m/s com predominância da direção sul e sem declive.....	107
Figura 3.18: Velocidade de propagação obtida entre o experimento realizado por MOULA (1996) e a simulação no FARSITE sob vegetação de savana tipo arbustiva.....	108

Figura 3.19: Velocidade de propagação obtida entre o experimento e a simulação sob vegetação de savana e gramínea.....	109
Figura 3.20: Mapa de classificação da cobertura vegetal para o FARSITE.....	111
Figura 3.21: (a) Taxa de propagação e perímetro do fogo obtidos a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de gramínea no setor do Sumaré; (b) Taxa de propagação e perímetro fogo obtidos a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de gramínea no setor do Horto.....	114
Figura 3.22: (a) Taxa de propagação e perímetro do fogo obtidos a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de Floresta no setor do Sumaré; (b) Não há propagação sobre a cobertura vegetal de Floresta no setor do Horto.....	114
Figura 3.23: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 0.28m/s – Sumaré.....	117
Figura 3.24: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 2.5 m/s – Sumaré.....	118
Figura 3.25: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 5.5 m/s – Sumaré.....	119
Figura 3.26: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 0.28 m/s – Horto.	120
Figura 3.27: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 2.5 m/s –Horto....	121
Figura 3.28: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 5.5 m/s - Horto...	122
Figura 3.29: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 0.28 m/s – Sumaré.	124
Figura 3.30: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 2.5 m/s – Sumaré.	125
Figura 3.31: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 5.5 m/s – Sumaré.	126
Figura 3.32: (a)-(b) Taxa de propagação e Intensidade do Fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 0.28 m/s – Horto...	127

Figura 3.33: (a)-(b) Taxa de propagação e Intensidade do Fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 2.5 m/s – Horto.....	128
Figura 3.34: (a)-(b) Taxa de propagação e Intensidade do Fogo no modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 5.5 m/s – Horto.....	129
Figura 3.35: Tempo da evolução da frente da chama no terreno (horas).....	130
Figura 3.36: Área queimada no plano horizontal e inclinada.....	131
Figura 3.37: Velocidade de propagação da frente da chama no terreno.....	132
Figura 3.38: Direção do avanço da propagação da frente da chama no terreno.....	132
Figura 3.39: Intensidade máxima da linha de fogo (kw/m).....	133

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Correção da temperatura e umidade relativa em função da cobertura de nuvens.....	18
Tabela 2.2: Parâmetro da umidade do combustível herbáceo na fase <i>greenup</i>	24
Tabela 2.3: Parâmetro da umidade do combustível herbáceo na fase <i>green</i>	25
Tabela 2.4: Parâmetro da umidade do combustível lenhoso na fase <i>pregreen</i>	26
Tabela 2.5: Parâmetro da umidade do combustível lenhoso na fase <i>green</i>	27
Tabela 2.6: Restrição a somatório do índice de Monte Alegre, de acordo com a quantidade de chuvas do dia.....	39
Tabela 2.7: Escala de risco da Fórmula de Monte Alegre.....	39
Tabela 2.8: Restrição a somatório do índice de Nesterov, de acordo com a quantidade de chuvas do dia.....	40
Tabela 2.9: Escala de risco do índice Nesterov.....	41
Tabela 2.10: Resumo dos resultados <i>IRF</i> proveniente da PCD do Sumaré no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.....	53
Tabela 2.11: Resumo dos resultados <i>IRF</i> proveniente da PCD do Horto no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.....	54
Tabela 2.12: Resumo dos resultados <i>FMA</i> proveniente da PCD do Sumaré no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.....	55
Tabela 2.13: Resumo dos resultados <i>FMA</i> proveniente da PCD do Horto no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.....	56
Tabela 2.14: Valores do coeficiente de correlação (r) entre os índices: fórmula de Monte Alegre (FMA), Nesterov (IN), Angstron (Ang), índice de resistência ao fogo (IRF) e índice meteorológico de incêndio (FWI), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Sumaré.....	63
Tabela 2.15: Valores do coeficiente de correlação (r) entre os índices: fórmula de Monte Alegre (FMA), Nesterov (IN), Angstron (Ang), índice de resistência ao fogo (IRF) e índice meteorológico de incêndio (FWI), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Horto.....	64
Tabela 2.16: Valores do coeficiente de correlação (r) entre variáveis meteorológicas (temperatura do ar, T em °C, umidade relativa, UR em %, velocidade do vento a 10 m, VV em m/s e precipitação, P em mm) e os índices:	

fórmula de Monte Alegre (<i>FMA</i>), Nesterov (<i>IN</i>), Angstron (<i>Ang</i>), índice de resistência ao fogo (<i>IRF</i>) e índice meteorológico de incêndio (<i>FWI</i>), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Sumaré.....	64
Tabela 2.17: Valores do coeficiente de correlação (<i>r</i>) entre variáveis meteorológicas (temperatura do ar, <i>T</i> em °C, umidade relativa, <i>UR</i> em %, velocidade do vento a 10 m, <i>VV</i> em m/s e precipitação, <i>P</i> em mm) e os índices: fórmula de Monte Alegre (<i>FMA</i>), Nesterov (<i>IN</i>), Angstron (<i>Ang</i>), índice de resistência ao fogo (<i>IRF</i>) e índice meteorológico de incêndio (<i>FWI</i>), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Horto.....	65
Tabela 3.1: Coeficientes <i>A</i> , <i>B</i> e <i>E</i> funções da área da superfície pelo volume.....	86
Tabela 3.2: Tipos de combustível utilizados no FARSITE.....	98
Tabela 3.3: Estatística do comportamento do vento nas estações Sumaré e Horto para os meses de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.....	105
Tabela 3.4: Biomassa acima do nível do solo (kg/m^2) e eficiência de combustão.	110
Tabela 3.5: Cenários da evolução do <i>FLI</i> , vento, taxa de propagação e intensidade do fogo durante a simulação da frente de fogo na cobertura de vegetação de gramínea nos setores do Sumaré e Horto.....	112
Tabela 3.6: Cenários da evolução do <i>FLI</i> , vento, taxa de propagação e intensidade do fogo durante a simulação da frente de fogo na cobertura de vegetação de floresta nos setores do Sumaré e Horto.....	112
Tabela 3.7: Parâmetros do fogo calculados pelo FARSITE.....	115
Tabela 3.8: Setor Sumaré – Gramínea.....	116
Tabela 3.9: Setor Horto - Gramínea.....	116
Tabela 3.10: Setor Sumaré – Floresta.....	123
Tabela 3.11: Setor Horto – Floresta.....	123

Lista de Símbolos

<i>FMA</i>	Fórmula de Monte Alegre
<i>UR</i>	umidade relativa do ar (%)
<i>Ang</i>	índice de risco de incêndio Angstron
<i>T</i>	temperatura do ar (°C)
<i>IN</i>	índice de risco de incêndio Nesterov
<i>d</i>	deficiência de umidade em milibar
<i>e</i>	pressão real de vapor da água em milibar
<i>n</i>	número de dias sem chuva
<i>IRF</i>	Índice de Resistência ao Fogo
<i>EMC</i>	conteúdo de umidade em equilíbrio (%)
<i>temp</i>	temperatura do bulbo seco (°F)
<i>MC1</i>	conteúdo de umidade do combustível no intervalo de tempo de 1-hora
<i>W_f</i>	peso da madeira do combustível (g)
<i>A, B, C</i>	variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente
<i>a</i>	número de dias que a madeira (<i>stick</i>) está exposta
<i>climat</i>	classe de clima adotado no modelo NFDRS
<i>MC10P1</i>	predição do conteúdo de umidade do combustível de 10-h no final do período1
<i>YMC10</i>	valor inicial do conteúdo de umidade no passo de tempo de 10-horas para o calculo de <i>MC10P1</i>
<i>BNDRY1</i> e <i>BNDRY 2</i>	umidade das primeiras 16 horas e das últimas 8 horas no período de 24 horas
<i>PDUR1</i> e <i>PDUR2</i>	predição da duração da precipitação nas primeiras 16 horas e nas últimas 8 horas no período de predição de 24 horas
<i>EMCbr1</i> e <i>EMCbr2</i>	conteúdo de umidade em equilíbrio para dois períodos derivados da temperatura e da umidade relativa média.
<i>BNDRYH</i>	condição de umidade no período de 24 horas
<i>PDUR</i>	duração da precipitação
<i>YMC100</i>	valor calculado de <i>MC100</i> para predição do dia
<i>EMCbar</i>	resposta a sazonalidade do modelo de umidade do combustível

<i>PHI</i>	estação de latitude
<i>lat</i>	latitude
<i>Decl</i>	ângulo zenital solar diário
<i>IDATE</i>	dia juliano do ano, 1 a 366, derivado do mês e dia
<i>Daylit</i>	horas de luz do dia (comprimento do dia)
<i>PM1000</i>	cálculo de <i>MC1000</i> para previsão de 7 dias
<i>BDYbar</i>	cálculo de <i>MC1000</i> para 7 dias
<i>BNDRYT</i>	condição de umidade no período de 24 horas.
<i>MCherb</i>	conteúdo de umidade do combustível herbáceo na fase <i>pregreen</i>
<i>MChrbi</i>	conteúdo de umidade do combustível herbáceo anterior ao estágio <i>greenup</i>
<i>X1000</i>	modelo de umidade de combustível herbáceo
<i>GRNDAY</i>	número de dias desde o início do estágio <i>greenup</i>
<i>DIFF</i>	<i>MC1000</i> no período de 24 horas
<i>Kwet</i>	fator de umidade (<i>wetting</i>)
<i>Ktemp</i>	fator de temperatura
<i>MCbrbp</i>	conteúdo de umidade em combustível herbáceo durante o período <i>greenup</i>
<i>Green</i>	fração do período de <i>greenup</i> que está sendo calculado <i>Mcherb</i>
<i>HerbGA</i> e	parâmetros relacionados com o conteúdo de umidade do combustível
<i>HerbGB</i>	herbáceo ou lenhoso no período <i>greenup</i>
<i>ANNTA</i>	determinados em função da classe de clima
<i>PERTA</i>	
<i>MCwood</i>	conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos na fase <i>pregreen</i>
<i>PREGRN</i>	conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos na fase dormente
<i>MCwodp</i>	umidade do combustível lenhoso na fase <i>greenup</i>
<i>woodGA</i> e	determinados em função das classes de clima (Tabela 2.5).
<i>woodGB</i>	
<i>MCwood</i>	umidade do combustível lenhoso na fase <i>green</i>
<i>RHOBED</i>	densidade de massa do leito combustível
<i>WTOT</i>	carregamento do combustível total

W1000	carregamento do combustível na classe de 1000-horas específico para cada modelo de combustível
<i>prof</i>	profundidade do leito combustível efetiva em pés.
<i>RHOBAR</i>	densidade da partícula do combustível
<i>WTOTL</i>	carregamento do combustível vivo
<i>WTOTD</i>	carregamento do combustível morto
<i>RHOL</i> e <i>RHOD</i>	densidades da partícula do combustível vivo e morto.
<i>BETBAR</i>	taxa de compactação (<i>packing</i>)
<i>SD</i> e <i>SL</i>	conteúdo mineral de sílica livre no combustível morto e vivo.
<i>WRAT</i>	a taxa do número de aquecimento do combustível vivo e morto
<i>HN1</i>	número de aquecimento da classe de 1-hora
<i>HNherb</i>	número de aquecimento da classe herbácea
<i>HNwood</i>	número de aquecimento da classe lenhosa
<i>W1N</i>	carregamentos do combustível referente as classes 1-hora, 10-hora, 100-hora, herbácea, lenhosa
<i>SG1</i>	razão da área da superfície pelo volume das classes de 1-hora, 10-hora, 100-horas, herbácea, lenhosa.
<i>R</i>	velocidade de propagação do incêndio de superfície (m/min)
<i>IR</i>	intensidade de reação
<i>Zeta</i>	taxa de fluxo de propagação sem vento
<i>PHISLP</i>	coeficiente de declividade
<i>PHIWND</i>	coeficiente do vento
<i>HTSINK</i>	fonte de calor
<i>SC</i>	componente de propagação
<i>IRE</i>	intensidade de energia liberada
<i>TAU</i>	tempo de resistência da frente da chama
<i>tempprm</i>	estimativa da temperatura do ar imediatamente em contato com o combustível
<i>CHI</i>	variável intermediária usada na determinação da probabilidade de ignição
<i>SCN</i>	parâmetro relacionado com o modelo de combustível específico
<i>PNORM</i>	escalar utilizado quando se assume que $P(I)$ igual a 100

IC	componente de ignição
BI	índice de queima
$MCOI$	ocorrência de incêndio por causa antrópica
LOI	índice de ocorrência por descarga elétrica
FWI	índice meteorológico de incêndios
θ	ângulo da taxa de propagação do incêndio
t	tempo
x_t, y_t	velocidade de propagação do fogo ortogonal em cada vértice (x_i, y_i) .
x_s, y_s	direção normal da frente do incêndio para cada vértice (x_i, y_i) .
D_i	distância média do segmento do perímetro do incêndio (m)
ω_i	direção da orientação do vértice
δ	diferença entre a direção da orientação e a orientação do ângulo do segmento do perímetro no sistema de coordenadas de superfície
ϕ	inclinação local na direção da orientação
α	orientação do ângulo do segmento do perímetro no plano horizontal
D_r	diferença da taxa de propagação entre o plano horizontal e o plano da inclinação local na direção da orientação do fogo (m)
V	Efeito do vento e topografia
V_o	taxa de propagação sem vento e com declividade nula
ϕ_w	fator que adiciona o crescimento devido à velocidade do vento
ϕ_s	fator de inclinação
θ_s	ângulo entre a inclinação do terreno e o plano horizontal
A, B, E	coeficientes (funções da área da superfície pelo volume)
W	velocidade vertical dos gases da chama
LB	razão do comprimento pela largura
HB	razão do recuo pelo avanço do incêndio
I_R	intensidade de reação
ξ	coeficiente de fluxo calorífico
ε	número de aquecimento efetivo
ρ_b	densidade da massa do combustível seca (kg/m^3)
Q_{ig}	calor de pré-ignição
I_b	taxa de energia liberada por unidade de comprimento da frente do fogo
h	campo de calor dissipado para gerar a energia necessária para vaporizar a

	umidade do material combustível
w	peso do combustível por unidade de área queimada na frente da chama
σ	razão da área da superfície pelo volume no leito combustível (m^{-1})
I_o	intensidade do fogo na copa (kw/m)
CBH	altura da base da copa
M	conteúdo de umidade foliar (%)
RAC	taxa de propagação do incêndio de copa ativo (m/min)
CBD	densidade de biomassa da copa
CFB	fração queimada da copa
E, E_o	fluxo de energia crítica e atual no avanço do fogo
a_a	constante que determina a aceleração para a taxa de propagação
a_{ca}	coeficiente para a fração queimada da copa
$R_{Cactual}$	taxa de propagação do incêndio de copa atual (m/min)
R_{Cmax}	taxa de propagação do incêndio de copa máximo (m/min)
T_t	tempo necessário para alcançar a taxa de propagação atual (min)

Capítulo 1

Introdução

Os incêndios florestais são um dos graves problemas ambientais que afeta não só o território brasileiro, mas também outros países como Estados Unidos, Canadá, Austrália, países da União Européia e países do Sudeste Asiático. No Brasil, a quase totalidade das queimadas é causada por atividade antrópica, devido o uso inadequado de recursos naturais, como por exemplo, o desmatamento desordenado e as queimadas para a limpeza de pasto e preparo do plantio (SOUZA *et al.*, 2004).

No Brasil, no início de 1998, um incêndio acidental destruiu cerca de 3,3 milhões de hectares no estado de Roraima dos quais mais de 1 milhão de hectares eram cobertos por floresta tropical, representando importantes perdas em termos econômicos e ecológicos. Entretanto, apesar da adoção de medidas de prevenção e monitoramento de incêndios em áreas vegetadas realizadas por órgãos como INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), que utilizam imagens de satélite na detecção de queimadas, e IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente), entre outros órgãos federais, estaduais e municipais, os incêndios ainda são considerados de extrema gravidade. Como exemplo, pode-se citar os incêndios ocorridos na Floresta Nacional (Flona) de Carajás, em Parauapebas, no sul do Pará, que queimou uma área correspondente a 584 hectares e os registros de 283 focos de fogo em Mato Grosso, sendo que 15 focos localizados em unidades de conservação (MANZI, 2005).

A redução sistemática dos habitats florestais, provenientes de sucessivos incêndios, tem estimulado o desenvolvimento de novas abordagens para a produção de mecanismos de prevenção, controle e combate ao fogo. As primeiras iniciativas nesse sentido procuraram determinar o índice de risco ou as condições meteorológicas que contribuem para a ocorrência e a persistência de incêndios florestais.

De uma forma geral, o índice de risco de incêndios é a medida da probabilidade da ocorrência de incêndios em uma determinada área (PHILLIPS *et al.*, 1978), sendo resultado de fatores constantes e variáveis, os quais afetam o início, a propagação e a dificuldade de controle de incêndios. Este índice de risco pode ser avaliado e adaptado às regiões de interesse, considerando-se variáveis meteorológicas, tipo de vegetação, topografia e fatores associados ao homem. Um modelo capaz de prever a ocorrência de incêndios, dia-a-dia, para domínios de interesse, resultaria em controle do incêndio e a distribuição de recursos para a extinção mais eficiente, além de reduzir custos, danos e perdas. O desenvolvimento de um modelo de previsão de incêndios sempre apresenta uma grande dificuldade, principalmente pelas incertezas associadas ao comportamento humano com relação ao fogo.

O desenvolvimento de um índice de risco de incêndio utiliza um vasto conjunto de fatores, usualmente os combustíveis, a topografia e os meteorológicos. A escolha de variáveis e os diferentes métodos usados para a sua combinação resultam numa multiplicidade de abordagens. Em face desta diversidade, várias soluções para a sua classificação têm sido propostas. Em função dos dados de entrada necessários, dois tipos gerais de métodos podem ser identificados: 1) método de risco estritamente meteorológico, que se baseia exclusivamente em dados sobre o estado das condições atmosféricas (temperatura, umidade relativa, precipitação e intensidade do vento) e 2) método de risco potencial, quando são consideradas abordagens mais avançadas, e inclui como entrada o estado da vegetação, o tipo de combustível e o seu conteúdo de umidade. Dentro do primeiro método, pode-se citar os índices Fórmula de Monte Alegre (SOARES, 1972), Índice de Risco de Angstron (CIANCIULLI, 1981) e Índice de Risco de Nesterov (CIANCIULLI, 1981). Os índices baseados no segundo método são: *McArthur's Fire Danger Meters* (NOBLE *et al.*, 1980), *U.S. National Fire Danger Rating System* (NFDRS) (DEEMING *et al.*, 1977), *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS) (VAN WAGNER, 1987). Os índices mais recentes utilizam estimativas da umidade da vegetação obtidas de imagens de sensores orbitais como o Risco de Fogo (RFC), desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Brasil, lançado em 1998 (SISMANOGLU *et al.*, 2002). Alguns índices ainda foram desenvolvidos para aplicação em áreas mais restritas, como o FIRETOOL (PIVELLO *et al.*, 1996) e o Mapeamento de Risco de Incêndio (FERRAZ *et al.*, 1998).

Uma vez iniciado o incêndio, a predição do seu comportamento é de extrema importância para sua supressão e alocação de esforços para conter o fogo. Desta maneira, é importante compreender não somente a caracterização do tipo de incêndio e a quantificação de sua intensidade, mas também o entendimento dos vários processos relacionados com o avanço da frente de fogo. Para isto, desenvolveram-se sistemas de predição de comportamento do avanço do incêndio na tentativa de predizer a forma do incêndio e a velocidade de propagação para o seu controle e combate e também na melhor compreensão e dimensão dos efeitos provocados pelo fogo no meio ambiente.

O desenvolvimento desses sistemas teve início em 1942 nos Estados Unidos. Os trabalhos atuais, entretanto, baseiam-se no modelo de ROTHERMEL (1972). A partir destes trabalhos, outros países iniciaram as suas pesquisas sobre o assunto. Podendo citar Canadá, França, Espanha e Austrália.

Devido à complexidade do problema físico dos incêndios florestais, buscou-se o desenvolvimento de sistemas integrados, que utilizam abordagens tecnológicas para criar novas perspectivas de análise que possibilitem uma maior compreensão do fenômeno. Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitiu a utilização de dados de naturezas diversas com maior resolução espacial e temporal. Além dos dados meteorológicos e imagens de sensores orbitais utilizados para estimar a umidade da vegetação, foram incorporados parâmetros de longo prazo, de caráter anual ou permanente, como por exemplo: tipo de vegetação; tipo e quantidade de combustível; padrões meteorológicos sazonais; declividade; exposição solar; uso da terra; malha viária; restrições de acesso; rede de aceiros; densidade populacional; padrões de distribuição espaço-temporal das queimadas (CHUVIECO *et al.*, 1997, FERRAZ *et al.*, 1998, PEREIRA, 2002). Sob esse ponto de vista, desenvolveram-se sistemas de predição do comportamento tais como DYNAFIRE (KALABOKIDIS *et al.*, 1991), BEHAVE (ROTHERMEL, 1972, ANDREWS, 1986), FARSITE (FINNEY, 1998), FireStation (LOPES *et al.*, 2002) e o EMBYR (HARGROVE *et al.*, 2000). Estes sistemas baseiam-se na combinação de modelos matemáticos como os de ROTHERMEL (ROTHERMEL, 1972), McARTHUR (NOBLE *et al.*, 1980) e RICHARD (RICHARD, 1990). Estes sistemas descrevem o comportamento do avanço da frente de incêndio.

Nos últimos anos, tem-se observado um interesse crescente no Brasil e em países como Portugal, México, Itália e Israel em pesquisas de metodologias de índice de risco e modelagem computacional do comportamento de incêndios florestais. Entretanto, uma das dificuldades para se propor um sistema de avaliação adequado do fogo é a falta de dados apropriados sobre o risco, incidência de queimadas, condições meteorológicas e o material combustível, mesmo em países com tecnologia mais desenvolvida (FREIRE *et al.*, 2002).

Muitos desses trabalhos partiram da utilização de modelos desenvolvidos em países como EUA e Austrália. Estes modelos baseiam-se em elementos que fazem parte de três sistemas: o combustível, o clima e as condições físicas do ambiente, interagindo entre si de forma complexa. A limitação existente em utilizar estes modelos refere-se aos fatores relacionados com o combustível para definição de parâmetros de entrada. Os tipos de combustíveis predominantes presentes nestas regiões são correspondentes às espécies de clima temperado que possuem características de combustibilidade diferentes, principalmente com relação às espécies presentes nas florestas tropicais. Além destas diferenças, existem ainda os aspectos relacionados com os ecossistemas formados nestas áreas que apresentam características fisionômicas e ecológicas bastante distintas.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho são testar e avaliar índices de risco de incêndio para o Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca) e analisar a modelagem computacional do comportamento do avanço da frente do fogo para o Parque. A integração destas informações objetiva a determinação das condições mais críticas para um incêndio iniciar e propagar, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de prevenção e combate de incêndios.

A área selecionada para o desenvolvimento do trabalho é o Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca). Esta área é uma unidade de conservação que apresenta características particularmente adequadas ao objeto da pesquisa, além de ser uma das maiores reservas urbanas do mundo com cerca de 3.300ha, localizada no município do Rio de Janeiro.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 1 aborda os fundamentos e motivações desta tese, assim como seus objetivos. No Capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica sobre os índices de risco de incêndio, incluindo a descrição dos materiais e métodos utilizados e os resultados obtidos. No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão sobre os principais trabalhos relacionados à modelagem computacional do avanço da frente do fogo. Ainda neste capítulo, mostra-se o sistema que simula o avanço da frente de incêndio usado no programa FARSITE e apresenta a descrição dos materiais e métodos utilizados na execução deste programa e a análise dos resultados obtidos. Finalmente, o Capítulo 4 apresenta as conclusões desse trabalho e sugestões para propostas futuras.

Capítulo 2

Índice de Risco de Incêndio

2.1 – Introdução

Os ecossistemas tropicais têm sofrido modificações profundas na sua paisagem, devido o aumento da interferência do homem, por meio de desmatamentos e queimadas, tornando-se mais suscetíveis ao fogo. A maior suscetibilidade ocorre devido à gradual alteração na estrutura da vegetação tropical e nas condições hidrológicas, aumentando a capacidade de inflamabilidade da vegetação e, conseqüentemente, elevando o nível de risco de incêndio.

No Brasil, as regiões mais agredidas pelo fogo, no âmbito da Amazônia Legal, situam-se nos Estados do Mato Grosso, Rondônia e Pará. Esse quadro é explicado pela grande ocupação que ocorreu nas décadas de 80 e 90, resultando na substituição da cobertura vegetal por pastagens e cultivos agrícolas. Junto a este processo, intensificou-se o uso do fogo como prática de limpeza da terra para o cultivo, remoção de pastagens e eliminação de restos de cultura. As unidades de conservação também sofrem pesadas perdas ecológicas em função dos incêndios que as atingem, quase sempre, a partir de queimadas praticadas em propriedades limítrofes. Isto se agrava, ainda mais, em face de inexistência, nessas unidades, de serviços estruturados de prevenção e combate a incêndios florestais (IBAMA, 1991).

A gravidade do problema levou o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), apoiados pelo Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD), em 1989, a elaborar e implementar um Programa Emergencial de controle de derrubadas e queimadas na Amazônia Legal, que resultou em expressivos ganhos no tocante à redução da prática de queimadas no ano

subseqüente (IBAMA, 1991). O trabalho desenvolvido pela extinta Comissão Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais deu origem a atual legislação que rege as atividades do setor e foi responsável, junto ao IBAMA, pela instituição do Programa de Prevenção e Combate ao Incêndio Florestal (PREVFOGO). Este programa é responsável pela definição e execução da política de controle de incêndios florestais e queimadas no País (SOARES, 1994). E, em 1998, após o grande incêndio florestal ocorrido em Roraima, o Governo Federal criou o Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal (PROARCO) que, em parceria com o INPE, estabeleceram um sistema de monitoramento e previsão climática para identificar as áreas de maior risco de incêndios florestais na região (SOUZA, *et al.*, 2004).

Ainda no Brasil, pode-se citar o sistema de monitoramento e detecção automática de focos de fogo desenvolvido e utilizado para auxiliar na tomada de decisão para escolha de ações mitigadoras dos eventos de fogo. PEREIRA *et al.* (1993) e PHULPIN *et al.* (2002) têm avaliado com bons resultados a detecção automática com dados de alta resolução. Em particular, o INPE tem um sistema de detecção automática de foco de fogo baseado em bandas termais dos satélites meteorológicos das séries NOAA e GOES¹, que também possuem um sistema de estimativa de índices de risco de fogo baseado em dados climatológicos e de previsão de eventos de fogo (SISMANOGLU *et al.*, 2002). Os resultados de ambos os sistemas são apresentados diariamente via *internet*. Além destes sistemas, existem dois outros programas similares o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) cujos resultados estão disponibilizados diariamente nos seguintes endereços na *internet*: www.inmet.gov.br e www.simper.br, respectivamente.

2.2 - Revisão Bibliográfica

O índice de risco de incêndio ou perigo de incêndio constitui uma tentativa de quantificar a probabilidade de um fogo ocorrer e se propagar quando existe uma fonte de ignição. Este índice é representado por um único número e deve ser avaliado diariamente usando dados observados ou medidos. MUTCH (1970) define como um

¹ NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*

termo geral que expressa o resultado dos fatores constantes e variáveis, os quais afetam as chances de um incêndio iniciar e propagar. Os fatores constantes que influenciam a ocorrência e a propagação dos incêndios são constituídos pelas características do material combustível, topografia, organização de controle dos incêndios, risco e valor dos recursos. Os fatores variáveis são constituídos pela umidade do material combustível, intensidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura de ponto de orvalho, precipitação, instabilidade atmosférica, mudanças da velocidade e direção do vento e radiação solar (VOLPATO, 2002). Outros fatores também são utilizados para avaliar o índice de risco como a ocupação do solo, histórico de incêndios, demografia, infra-estrutura e a interface floresta e meio urbano.

Os índices de risco de incêndio são classificados de acordo com os dados de entrada, sendo considerados dois tipos de métodos: método estritamente meteorológico e método potencial. O método meteorológico é agrupado da seguinte forma: não-acumulativos e acumulativos. Os índices não-acumulativos consideram apenas valores diários dos parâmetros. Exemplos deste tipo de índice são Angstron (CIANCIULII, 1981) e Lourenço (LOURENÇO, 1991). E, os acumulativos que utilizam registros de dados anteriores, pode-se citar dentre os índices Nesterov (CIANCIULII, 1981), Fórmula de Monte Alegre (SOARES, 1972) e Logarítmico de Telitsyn (TELITSYN, 1970). Em uma abordagem mais recente, o método potencial pode ser classificado de acordo com a sua escala temporal como: estruturais ou de longo prazo derivados a partir de fatores que não variam rapidamente como a ocupação do solo e a topografia. Neste tipo de abordagem, é necessária também uma base de registros históricos de incêndios em um período significativo, pois sua determinação é a partir de estudos de correlação; dinâmicos ou de curto prazo baseiam-se em parâmetros que variam de forma quase contínua como o estado da vegetação e as condições meteorológicas. Este método tem finalidade de detectar as condições de inflamabilidade dos combustíveis florestais; e, por último, o método integrado ou avançado que incluem variáveis estruturais e dinâmicas (FREIRE *et al.*, 2002).

A estimativa do risco de incêndio em curto prazo tem em vista o apoio à tomada de decisões atualizadas sobre atividade de predição no plano de mitigação do fogo e pode ser usada para diversos fins. Estes podem incluir a difusão de avisos, o estabelecimento de limitações a certas atividades recreativas ao ar livre, ou

planejamento de ações de vigilância e prevenção. Existem muitas variações nos sistemas de cálculos dos índices de previsão de incêndios utilizados em diferentes países, podendo existir dentro de um país vários sistemas diferentes nas diversas regiões que o compõem.

O primeiro sistema de índice de previsão de incêndios florestais foi desenvolvido pelo Serviço dos Estados Unidos, que integrou as investigações e experiências das diversas organizações federais, estaduais e privadas de combate ao fogo. A organização da proteção em larga escala contra incêndios florestais iniciou-se nos Estados Unidos logo após a criação dos seus Serviços Florestais, integrados ao Ministério da Agricultura. Com o grande incêndio de Idaho em 1905, despertou a opinião pública para a necessidade do desenvolvimento de um sistema de proteção mais eficiente, pelo menos nas florestas nacionais (MACEDO *et al.*, 1985).

GISBORNE (1936) apresentou a primeira abordagem sistemática sobre o problema da indexação do risco de incêndios. Neste trabalho, ele mostrou um medidor de risco de incêndio formado por uma régua de cálculo em cartão, que correlaciona cinco variáveis e expressa o seu efeito utilizando sete classes de risco. As variáveis utilizadas são: 1) o teor de umidade dos combustíveis, determinado pelo peso de uma vara indicadora; 2) umidade relativa do ar; 3) data desde o início da estação dos incêndios (medindo o estado do combustível e a radiação solar); 4) atividades dos agentes de ignição de fogos (essencialmente faíscas); 5) raio de visibilidade. A régua de Gisborne possuía limitações, pois incluía fatores de inflamabilidade e logísticas difíceis de correlacionar diretamente em uma simples escala numérica. Apenas as três primeiras variáveis (teor de umidade do combustível, umidade do ar e a data) mediam a inflamabilidade do combustível. Um dos fatores mais importantes o vento não foi considerado inicialmente, tendo sido acrescentado posteriormente (SAMPAIO, 1999).

Em 1940 e 1954, o Serviço Florestal dos Estados Unidos, US *Department of Agriculture*, Ogdend Utah desenvolveu um sistema baseado no controle de fatores ambientais e no conteúdo de umidade do combustível. Em 1954, vários sistemas de índice de risco foram usados nos Estados Unidos. Cada sistema era gerenciado por agências federais e regionais dispersas em seções por todo país. Devido às dificuldades em estabelecer comunicação entre as instituições, buscou-se um sistema uniforme de

índice de risco de incêndio e de seu comportamento. A partir disto, o comitê de pesquisa do serviço florestal e o pessoal de controle de incêndios em 1958 criou um sistema nacional de índice de risco. E, em 1968, estabeleceu-se o *National Fire Danger Rating System* (NFDRS) baseado na pesquisa de FOST COLLIN (DEEMING *et al.*, 1977). Uma versão preliminar do sistema foi testada no Arizona, no Novo México e Geórgia em 1970. Como resultado, em 1972, foi lançada a primeira versão do NFDRS. O sistema foi operado manualmente até 1975 quando uma versão automática foi disponibilizada no sistema *Administrative and Forest Fire Information Retrieval and Management System* (AFFIRMS). O sistema ficou em testes por cinco anos, com várias melhorias sendo adicionadas baseadas nas respostas dos usuários e, em 1978, lançou-se uma nova versão (BRADSHAW *et al.*, 1984). Em 1988, os usuários do sudeste dos EUA contribuíram com sua experiência levando ao lançamento de uma versão que apresentava uma melhor caracterização da influência da seca e a resposta pós-precipitação (BURGAN, 1987). Em 1993, o AFFIRMS foi substituído pelo WIMS (*Weather Information Management System*), este sistema é utilizado nos Estados Unidos nos dias de hoje com alguns ajustes.

O sistema de índice de previsão de incêndios atualmente utilizado no Canadá, o *Canadian Forest Fire Danger Ranger System* (CFFDRS) teve o seu desenvolvimento desde 1960. Entretanto, segundo MACEDO *et al.* (1985), as investigações para o estabelecimento de um sistema de indexação de perigo de incêndio iniciaram-se no Canadá em 1929, na província de Ontário, tendo continuado, desde então, permitindo chegar ao sistema nacional atualmente em vigor. Este sistema é descrito por ALEXANDER (1982), BEALL (1967) e VAN WAGNER (1970, 1975, 1987). Ele é constituído por quatro módulos ou subsistemas: *Fire Weather Index* (FWI), *Fire Behavior Prediction* (FBP), *Fire Occurrence Prediction* (FOP) e *Accessory Fuel Moisture System* (AFMS). O perigo de incêndio é estimado com base nas observações de pluviosidade, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Também é permitido introduzir correções correspondentes a variações sazonais do estado da vegetação e da insolação. Este sistema também é utilizado pelo Serviço de Incêndio Florestal da Espanha. A adoção deste índice baseou-se em experimentos a fim de adaptar um sistema as condições fitoclimáticas da Espanha.

Na Austrália, existem muitos sistemas de previsão de índices de incêndios, mas o método mais utilizado é o índice de risco de incêndio de McARTHUR (1967) para florestas e vegetação rasteira, principalmente, no oeste da Austrália (CHENEY, 1991). O sistema de McARTHUR é baseado em uma série de tabelas em forma de círculos e foi desenvolvido a partir da observação de 800 experimentos de fogo, utilizando diferentes tipos de combustíveis. NOBLE *et al.* (1980) converteu as medidas de risco de incêndio de McARTHUR para equações matemáticas, que são aplicadas na determinação do índice de risco de incêndio.

A comparação realizada por CHANDLER *et al.* (1983) dos sistemas CFFDRS e da Austrália. Mostrou que os sistemas são similares, pois derivam de análises estatísticas de grande quantidade de dados de campo. Elas são baseadas em testes de incêndios, onde as tabelas de risco são construídas de forma empírica combinando condições meteorológicas, umidade de combustível e dado de comportamento de incêndios de diferentes estações de campo para selecionar as localizações.

Na França, a determinação do índice é baseada na capacidade de armazenamento de água na superfície do solo, na intensidade do vento, no ponto de orvalho e na temperatura máxima (CARREGA, 1991). Em 1985, foi proposto o Índice de Carrega (185) inicialmente elaborado pelo departamento de Alps Maritime. Esse índice de ignição e propagação de incêndios tornou-se aplicável em todo o Sul da França onde foi testado pelo Serviço Nacional de Meteorologia. A expressão é baseada na reserva diária de água no solo, conforme o método de THORNTHWAITE² e MATHER (1955), no menor teor de umidade relativa do ar, na velocidade do vento em graus Beaufort³ e no coeficiente da vegetação na classe de 0,8 a 1.

O índice de previsão de incêndios florestais na Itália é baseado em valores diários de evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) (BOVIO *et al.*, 1994). Na Rússia, um dos índices mais utilizados é o Nesterov. Este índice baseia-se nos produtos diários do déficit de umidade (em milibários) e temperatura do ar. Sendo considerados os dias com precipitação inferior a 2,5 mm.

² método de Thornthwaite – é a média mensal da evapotranspiração potencial .

³ graus Beaufort – é um sistema para estimar e informar a velocidade do vento.

O índice de previsão de incêndio florestal utilizado em Portugal é de dois tipos: o índice de Angstron e o índice de Lourenço. O Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísico adotaram o índice de Angstron que é um fator empírico também usado na Suécia e que utiliza a temperatura e a umidade relativa do ar às 13:00 horas. Este índice não é acumulativo, pois determina o grau de perigo de incêndios florestais apenas para um determinado dia, sem considerar as condições meteorológicas dos dias anteriores. Já o índice de Lourenço, desenvolvido em Portugal, leva em consideração, além da temperatura do ar e a umidade relativa, o fator de correção de acordo com a velocidade do vento.

No Brasil, a adoção dos índices de risco de incêndios iniciou-se em 1963, motivado pela ocorrência do trágico incêndio, que atingiu uma área entorno de dois milhões de hectares no estado do Paraná. Devido à dificuldade de obtenção de informações básicas, inclusive variáveis meteorológicas, os índices sugeridos naquela oportunidade foram os de Angstron e Nesterov (SOARES, 1998).

O primeiro trabalho, que avaliou as variáveis meteorológicas para previsão de perigo de incêndio na vegetação, foi realizado por SOARES (1972) que desenvolveu a fórmula de Monte Alegre (nome da fazenda onde foi realizada a coleta de dados) no Paraná. Para o desenvolvimento da expressão, foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, déficit de saturação do ar, diferença entre a temperatura do ar e o ponto de orvalho e número de dias sem precipitação maior que 10 mm (medidas de cinco a trinta dias antes de cada ocorrência de fogo). Foram determinadas as correlações entre as variáveis meteorológicas, a ocorrência de incêndios e as áreas queimadas. Pela análise dos resultados, verificou-se que alguns fatores, como umidade relativa, déficit de saturação do ar e diferença entre a temperatura do ar e o ponto de orvalho, foram mais fortemente correlacionados, enquanto a temperatura do ar mostrou uma correlação muito baixa com a ocorrência de incêndios.

Nos últimos anos, tem-se observado o desenvolvimento de índices de risco por métodos integrados que combinam o mapa de combustíveis, variáveis meteorológicas e informações relacionadas com a biomassa, para detectar alterações na inflamabilidade dos combustíveis. Para isto, são integrados dados de satélite com redes de estações

meteorológicas de alta densidade. Com esses dados são gerados os Índices de Vegetação de Diferença Normalizado (NDVI), determinados a partir de imagens obtidas pelo sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* que fornece informações do aspecto da vegetação que serão usadas para o cálculo da umidade do combustível. Seguindo esta tendência, nos Estados Unidos, foi desenvolvido o Índice de Potencial de Incêndio (*Fire Potential Index – FPI*), que incorpora dados de satélite e observações de superfície num único índice de risco (BURGAN *et al.*, 1998). Este método possui maior resolução espacial que o NFDRS (1 km em oposição a 10 km), foi testado em vários países como Espanha, Chile, México e França, obtendo-se bons resultados (LOPÉZ *et al.*, 2002). Através da utilização de um SIG, este método pode ser usado para mapear o potencial de fogo à escala nacional ou local (CHUVIECO *et al.*, 1996). No entanto, os seus autores reconhecem que o modelo exige alguns melhoramentos, referentes ao nível do método de interpolação dos dados meteorológicos. O NFDRS também é utilizado como sistema base para o cálculo do índice com a resolução de 1 km (CARLSON *et al.*, 2003). No Brasil pode-se também citar os trabalhos de SANTOS (2004) e SCHROEDER (2001) que utilizam dados de AVHRR para determinar e identificar índices de risco de queimadas e padrões climatológicos para ocorrência incêndios.

2.3 - Índice de Risco de Incêndios

Nesta seção, são descritos os índices utilizados neste trabalho com o objetivo de comparar os resultados obtidos de duas áreas com características ambientais diferentes e avaliar o método de suporte do sistema de prevenção e mitigação em tempo real do risco de incêndio florestal implementado na área do Parque Nacional da Tijuca.

2.3.1 - Sistema Nacional de Índice de Risco de Incêndio Americano (NFDRS)

O sistema nacional de índice de risco de incêndio (*National Fire Danger Rating System - NFDRS*) é utilizado para determinar o risco de incêndios, em vários países, dos

tipos superfície e solo. Os incêndios com propagação tipo *spotting*⁴ e de copa (biomassa aérea) não são determinados por este sistema. Contudo, ele permite identificar o nível crítico do risco de incêndio, onde tal comportamento possui alta probabilidade de ocorrer, auxiliando a definição da estratégia de controle dos aspectos que afetam a ocorrência e o comportamento. Para isto, assumiu-se que o comprimento da chama está diretamente relacionado ao comportamento do incêndio e no esforço necessário para contê-lo. Assim, o sistema avalia as condições mais susceptíveis em uma determinada área e as condições meteorológicas, estabelecendo taxas que são fisicamente interpretadas em termos de ocorrência do incêndio e do seu comportamento. Estas avaliações são acompanhadas ou combinadas com informações históricas dos incêndios e do planejamento utilizado no controle do mesmo. O NFDRS é baseado em física da combustão, constantes e coeficientes desenvolvidos em laboratórios, refletindo as relações entre os vários combustíveis, condições meteorológicas, topografia e condições de risco. Este sistema permite ao usuário representar o ecossistema através da determinação da cobertura da vegetação, da topografia, do tipo de combustível, da localização e dos aspectos meteorológicos (BURGAN, 1988). O NFDRS contém 20 modelos de combustível que representam a vegetação e os tipos de combustível. Ele é utilizado em vários países para estimar o diagnóstico e prognóstico do risco do fogo.

A Figura 2.1 apresenta a estrutura básica do sistema NFDRS que está dividida em cinco partes. A primeira parte refere-se à descrição adequada da região para obtenção de resultados com boa representatividade. Na descrição, são necessárias as seguintes informações: tipo de combustível, classe de inclinação, tipo de vegetação, classe climática e precipitação anual e a localização. Ainda nesta parte, é necessária a entrada de informações ambientais, compreendendo: informações meteorológicas e sobre o estado da vegetação. O processo de aquisição dessas informações é apresentado nas seções 2.4.2.1 e 2.4.3.2. A segunda parte corresponde à determinação do conteúdo de umidade do combustível, que é calculada a partir das informações disponibilizadas na primeira parte do sistema e das propriedades físicas e químicas da partícula do combustível. A determinação da umidade do combustível e as suas propriedades são mostradas ainda nesta seção. A terceira parte refere-se à estimativa de fontes de risco que pode ser por origem de descarga elétrica ou por causa antrópica. Neste trabalho, por

⁴ *Spotting* – é um tipo de incêndio que consiste em fagulhas que são transportadas por colunas de convecção ou pelo vento para fora do perímetro principal do fogo.

não dispor de dados de descarga elétrica para a região de estudo, não se utilizou este dado. Com relação à atividade antrópica, utilizou-se os valores estipulados pelo sistema que atribui um valor para os dias da semana e outro valor para o final de semana com maior peso. A quarta e quinta parte desse sistema consistem nos parâmetros que determinam o comportamento do incêndio e os índices de risco mostrados na Figura 2.1.

Neste trabalho, assume-se que o índice de resistência ao fogo (*IRF*) (*Fire Load Index – FLI*) é o parâmetro indicador do risco de fogo. O *IRF* é um dos índices calculados no NFDRS e representa o esforço necessário para conter um incêndio, resultado se uma fagulha é introduzida dentro de um complexo de combustível. Para o cálculo de *IRF*, são utilizados os parâmetros de índice de queima, obtido a partir do componente de propagação e o componente de liberação de energia e o índice de ocorrência de causa antrópica, que por sua vez é determinado a partir do componente de ignição. Este índice é resultante da combinação de fatores constantes e variáveis que afetam o início, propagação e dificuldade de controle do fogo.

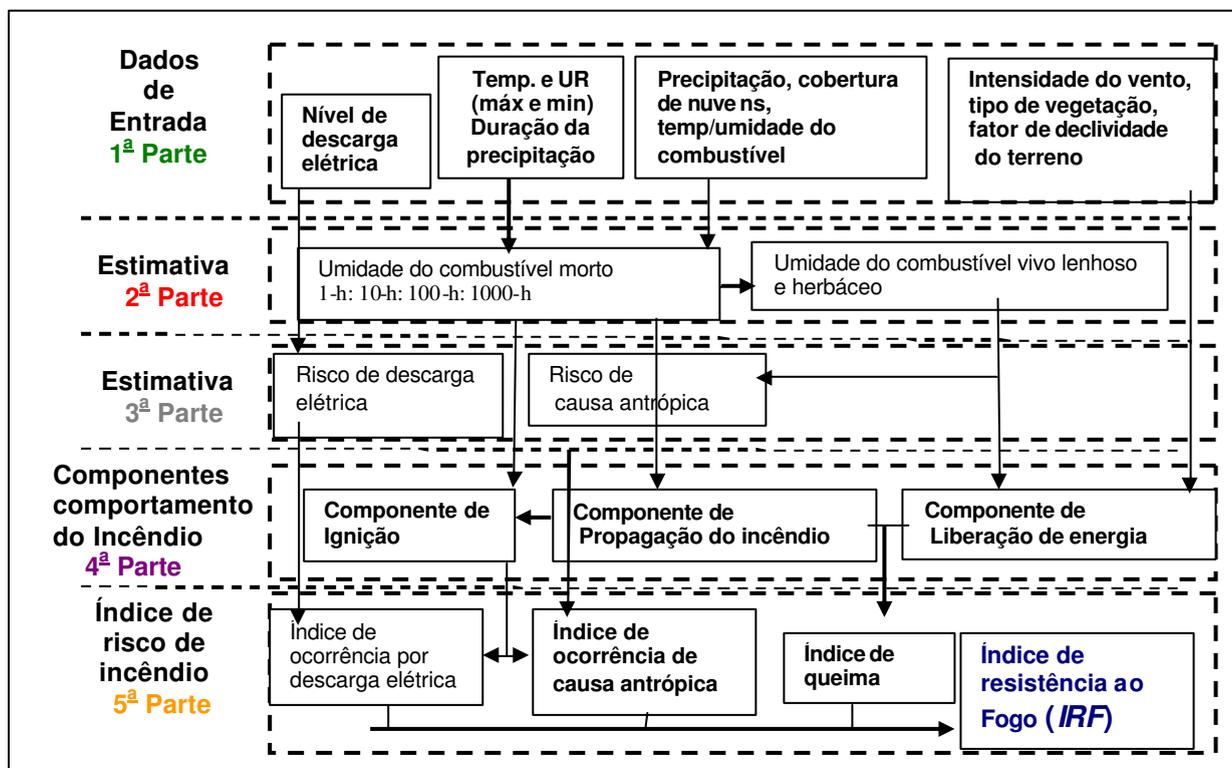


Figura 2.1: Estrutura do Sistema Nacional de Índice de Risco de Incêndio (NFDRS). O índice de resistência ao incêndio-*IRF* (*Fire Load Index*) como resultado final do sistema.

Fonte: DEEMING *et al.*, 1977.

Nesta seção apresentam-se as formulações matemáticas e teóricas necessárias para a determinação dos índices de risco de incêndio utilizando este sistema. O primeiro passo é a determinação do conteúdo de umidade do combustível. Para isto, o sistema (NFDRS) dividiu o combustível em duas classes: combustível vivo e combustível morto. Esta divisão é utilizada para analisar a troca de umidade com o meio. O combustível vivo é classificado em: herbáceo anual, herbáceo perene e plantas lenhosas (arbustos e árvores). Dentro de cada classe é avaliado o conteúdo de água na planta viva, dependendo do estágio fenológico. O combustível morto é representado pelas classes de 1-hora, 10-horas, 100-horas e 1000-horas. Estas classes estão relacionadas com o tempo de exposição da biomassa com as condições atmosféricas. Portanto o modelo deve ser ajustado sazonalmente.

2.3.1.1 - Umidade do Material Combustível Morto

O modelo de umidade do combustível morto consiste na matéria orgânica que se encontra sobre o solo, onde o seu conteúdo de umidade é controlado pelo gradiente de pressão do vapor entre a atmosfera e o elemento combustível. Esse gradiente é proporcional à diferença entre o conteúdo de umidade da matéria orgânica e o conteúdo de umidade em equilíbrio. O conteúdo de umidade em equilíbrio (*EMC*) é a umidade contida no combustível morto que, em um estado constante, alcança o equilíbrio. Ele é calculado utilizando a temperatura do bulbo seco (*temp*) e a umidade relativa (*UR*) da interface combustível e atmosfera, conforme as seguintes expressões:

Se $UR < 0,1$

$$EMC = 0.03229 + 0.281073 * UR - 0.000578 * temp * UR \quad (2.1a)$$

Se $UR \geq 0,1$ e $UR < 0,5$

$$EMC = 2.22749 + 0.160107 * UR - 0.014784 * temp \quad (2.1b)$$

Se $UR \geq 0,5$

$$EMC = 21.0606 + 0.005565 * UR^2 - 0.00035 * UR * temp - 0.483199 * UR \quad (2.1c)$$

A umidade do combustível morto é representada pelas classes de 1-hora, 10-horas, 100-horas e 1000-horas. Estas classes estão relacionadas com o tempo de resposta (tempo que o combustível alcança o equilíbrio no conteúdo de umidade) e são determinadas em função do diâmetro. As classes de combustível morto são: o de 1h corresponde a combustíveis lenhosos cilíndricos de tamanho de 0 - 0,635 cm; o de 10 h corresponde a combustíveis lenhosos redondos de 0,635 - 2,54 cm; o de 100 h corresponde a combustíveis lenhosos redondos de 2,54 - 7,62 cm e 1000 h corresponde a combustíveis lenhosos redondos de 7,62 - 20,32 cm.

- **Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 1-hora (MC1)**

O método mais usado para descrever o processo de troca de umidade do combustível no intervalo de tempo de 1-hora é o desenvolvido pelo sistema de índice de risco de incêndio da Califórnia (USDA 1958, revisado 1968). Este método é baseado nas expressões (2.2) e (2.3). A equação (2.2) é utilizada para determinar a umidade do modelo de 1-hora no primeiro momento, empregando somente a umidade do combustível em equilíbrio. A equação (2.3) é usada para o cálculo da umidade do modelo de 1-hora para as horas subsequentes. Para tal, utiliza-se a umidade do combustível no intervalo de tempo de 10-horas obtido no momento inicial. Em condições onde ocorra precipitação no período observado, assume-se que *MC1* é igual a 35,0.

$$MC1 = 1.03 * EMC \quad (2.2)$$

$$MC1 = \frac{(4.0 * EMC + MC10)}{5.0} \quad (2.3)$$

sendo *MC1* o conteúdo de umidade do combustível no intervalo de tempo de 1-hora e *MC10* o conteúdo de umidade combustível no intervalo de tempo de 10-hora.

No modelo, é utilizado um fator de ajuste de exposição dos instrumentos. Este fator regula a umidade relativa e a temperatura do ar em função do nível de cobertura de nuvens. Ele é mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: correção da temperatura e umidade relativa em função da cobertura de nuvens.

	Cobertura de nuvens			
	0,0 - 0,1	0,1 - 0,5	0,6 - 0,9	0,9 - 1,0
Temperatura °F (adicionar)	+25	+19	+12	+5
Umidade Relativa(multiplicar) (%)	*0,75	*0,83	*0,92	*1,00

- **Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 10-horas (MC10)**

A expressão utilizada para obter a umidade do combustível no intervalo de tempo de 10-horas é a equação (2.4). Caso não utilize o parâmetro correspondente ao peso da madeira do combustível, emprega-se a equação (2.6).

$$MC10 = A * C + B * C * (W_f - 100) \quad (2.4)$$

$$A = a/60.0 \quad (2.5a)$$

$$B = 1.0 + (0.02 * a/30.0) \quad (2.5b)$$

$$C = c \lim at/4.0 \quad (2.5c)$$

$$MC10 = 1.28 * EMC \quad (2.6)$$

sendo $MC10$ o conteúdo de umidade da madeira do combustível no intervalo de tempo 10-horas; W_f o peso da madeira do combustível (g); A a variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente; B a variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente; C a variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente; a o número de dias que a madeira (*stick*) está exposta; *climat* a classe de clima adotado no modelo NFDRS, e o valor igual a 100 refere-se ao peso seco da madeira do combustível.

Para a predição da umidade do combustível para período de 24 horas, utilizando o modelo de 10-horas, necessita-se de dados de temperatura e umidade máxima e mínima, duração da precipitação e conteúdo de umidade de equilíbrio. Este período é dividido em duas partes: a primeira refere-se às 16:00 horas iniciais e o segundo representa as 8:00 horas finais. Para isto, são definidas as seguintes expressões:

$$MC10P1 = YMC10 - (BNDRY1 - YMC10) * (1.0 - 1.1 * \exp(-1.6)) \quad (2.7)$$

$$MC10P2 = MC10P1 - (BNDRY2 - MC10P1) * (1.0 - 0.87 * \exp(-0.8)) \quad (2.8)$$

$$BNDRY1 = \frac{((16.0 - PDUR1) * EMCbr1 + (2.7 * PDUR1 + 76.0) * PDUR1)}{16} \quad (2.9)$$

$$BNDRY2 = \frac{((8.0 - PDUR2) * EMCbr2 + (2.7 * PDUR2 + 76) * PDUR2)}{8} \quad (2.10)$$

$$MC10 = MC10P2 \quad (2.11)$$

sendo $MC10P1$ a predição do conteúdo de umidade do combustível de 10-h no final do período1; $MC10P2$ a predição do conteúdo de umidade do combustível de 10-h no final do período 2; $YMC10$ o valor inicial do conteúdo de umidade no passo de tempo de 10-horas para o calculo de $MC10P1$; $BNDRY1$ e $BNDRY2$ são as umidades das primeiras 16 horas e das últimas 8 horas no período de 24 horas, aplicadas para predizer o conteúdo de umidade do combustível para o intervalo de tempo de 10-horas; $PDUR1$ e $PDUR2$ são as predições da duração da precipitação nas primeiras 16 horas e nas últimas 8 horas no período de predição de 24 horas e $EMCbr1$ e $EMCbr2$ são os conteúdos de umidade em equilíbrio para dois períodos derivados da temperatura e da umidade relativa média.

- **Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo de 100-horas (*MC100*)**

O modelo de umidade de combustível morto no intervalo de tempo de 100-horas do sistema NFDRS calcula as condições para um período de 24 horas, utilizando *EMC* que representa a umidade e o déficit hídrico potencial da atmosfera. As condições são determinadas a partir da duração da precipitação, temperatura máxima e mínima e a umidade relativa. Neste modelo, utilizam-se as seguintes expressões:

$$MC100 = YMC100 + (BNDRYH - YMC100) * (1.0 - 0.87 * \exp(-0.24)) \quad (2.12)$$

$$YMC100 = 5.0 + (5.0 * c \lim at) \quad (2.13)$$

$$BNDRYH = \frac{((24.0 - PDUR) * EMCbar + PDUR * (0.5 * PDUR + 41.0))}{24} \quad (2.14)$$

sendo *BNDRYH* a condição de umidade no período de 24 horas; *PDUR* a duração da precipitação e *YMC100* o valor calculado de *MC100* para predição do dia.

O parâmetro *EMCbar* estabelece a resposta à sazonalidade no modelo de umidade do combustível. Ele baseia-se no comprimento do dia e na umidade do combustível em equilíbrio máximo e mínimo, mostrado na equação (2.15).

$$EMCbar = \frac{(Daylit * EMC \min + (24.0 - Daylit) * EMC \max)}{24} \quad (2.15)$$

$$Daylit = 24 * \left(\frac{1 - a \cos(\tan(PHI) * \tan(decl))}{3.1416} \right) \quad (2.16a)$$

$$PHI = lat * 0.01745 \quad (2.16b)$$

$$Decl = 0.41008 * \sin((IDATE - 82) * 0.01745) \quad (2.16c)$$

sendo PHI a estação de latitude; lat a latitude; $Decl$ o ângulo zenital solar diário; $IDATE$ o dia juliano do ano, 1 a 366, derivado do mês e dia; $Daylit$ as horas de luz do dia (comprimento do dia).

- **Modelo de Umidade do Combustível Morto no Intervalo de Tempo para 1000-horas (MC1000)**

O modelo de umidade do combustível para 1000-horas obedece ao mesmo padrão que o modelo para 100-horas, definido na equação (2.17), mas precisa das condições médias de 7 dias ou 168 horas para compensar a instabilidade de 24 horas (FOSBERG *et al.*, 1981). O período de 7 dias é utilizado para que o cálculo seja feito para cada dia da semana. O valor médio para 7 dias é definido através da expressão (2.18).

$$MC1000 = PM1000 + (BDYbar - PM1000) * (1.0 - 0.82 * \exp(-0.168)) \quad (2.17)$$

$$BDYbar = \frac{(BNDRYT(1) + \dots + BNDRYT(7))}{7} \quad (2.18)$$

$$BNDRYT = \frac{((24.0 - PDUR) * EMCbar + PDUR * (2.7 * PDUR + 76.0))}{24} \quad (2.19)$$

sendo $PM1000$ o cálculo de $MC1000$ para previsão de 7 dias; $BDYbar$ o cálculo de $MC1000$ para 7 dias e $BNDRYT$ a condição de umidade no período de 24 horas.

2.3.1.2 - Umidade do Material Combustível Vivo

O modelo de umidade do combustível vivo baseia-se no modelo de incêndio de ROTHERMEL (1972), que trata de forma mais real o combustível vivo. Deste modo, o combustível passa a ser a fonte e o sumidouro de calor. Ele torna-se fonte de calor, quando o seu conteúdo de umidade é suficiente para permitir o dessecamento e a ignição desencadeando o processo de combustão. Entretanto, se o conteúdo de umidade

estiver acima do limite crítico⁵, o combustível vivo não queima, mas age como sumidouro de calor.

Embora este modelo não seja baseado em princípios rigorosos da fisiologia vegetal, o modelo de umidade do combustível vivo estabelece uma estimativa mais consistente e analítica da umidade contida na cobertura herbácea viva e nos galhos dos arbustos lenhosos (BRADSHAW *et al.*, 1984).

No desenvolvimento do sistema NFDRS, em 1978, descobriu-se que a resposta da umidade do combustível no passo de tempo de 1000-horas ao ciclo de umidade e a seca é similar a obtida pelo combustível vivo. Assim, assume-se que a umidade do combustível no passo de tempo de 1000-horas serve como fator meteorológico, utilizado para igualar os ciclos de umidade e seca dos combustíveis vivos.

A vegetação apresenta uma adaptação aos vários regimes de umidade em resposta a diferentes anomalias de precipitação. Entretanto, o modelo de umidade do combustível de 1978 estabelece que a taxa de seca seja por classe de clima.

Neste sistema, a umidade é analisada para um intervalo de tempo curto e sazonal, utilizando duas classes de combustível vivo. Estas classes de combustível correspondem à vegetação herbácea (gramíneas e *forbs*) e vegetação lenhosa (*woods shrubs*). Assim, estas classes são utilizadas para simular o processo de secura e esverdeamento em resposta às flutuações de umidade em um período curto e sazonal. Além de acompanhar a influência sobre a vegetação da variação das condições ambientais, buscando-se reproduzir o processo fisiológico da vegetação relacionado com o ajuste à periodicidade sazonal da radiação, duração do dia, temperatura e precipitação (quanto ao início e à quantidade). O sistema é dividido em quatro fases que representam o desenvolvimento vegetativo do crescimento à senescência da planta (*pregreen, greenup, green* e transição).

O curso temporal da atividade vegetativa das plantas é ajustado às condições locais durante a estação de crescimento. Nos trópicos secos e nos subtropicais, a estação

⁵ Limite crítico: é o estado do combustível onde não há perda e nem ganho de umidade.

de crescimento é limitada pela intensificação da deficiência hídrica quando o período seco se inicia. A atividade das plantas nas zonas temperadas e nas zonas de clima frio é sincronizada com as estações pela sazonalidade térmica e luminosa. Frequentemente, a duração do dia é a precursora da alteração da atividade, sendo reforçada pela mudança de temperatura (LARCHER, 2000).

- **Modelo de Umidade do Material Combustível Herbáceo**

No material combustível herbáceo, o processo de perda de umidade é determinado a partir dos seguintes parâmetros: umidade do combustível morto no passo de tempo de 1000-horas, classes de clima e estações do ano. Neste modelo o processo de perda de umidade nas fases que antecedem o estágio *green* ocorre gradualmente em um ritmo mais lento não havendo diferença entre a vegetação anual e perene. Para determinar este processo de troca de umidade, usam-se três fases: *pregreen*, *greenup*, *green*. Estas fases são representadas pelas equações (2.20 – 2.21).

$$MCherb = MC1 \quad (2.20)$$

sendo *MCherb* o conteúdo de umidade do combustível herbáceo na fase *pregreen*.

A fase *greenup* descreve o aumento gradual da umidade do combustível herbáceo. No início deste processo a variável *greenup* possui o conteúdo de umidade do combustível herbáceo (*MCherb*) igual a umidade do combustível herbáceo do dia anterior (*MChrbi*).

$$MCherb = MChrbi \quad (2.21)$$

O modelo do combustível vivo ajusta-se gradualmente ao processo de esverdeamento. A fase *greenup* varia no período de 7 dias para a classe de clima de 1 e 28 dias para a classe de clima 4 (Tabela 2.2). Para calcular *MCherb* neste dias utiliza-se a equação (2.22). A determinação do parâmetro *MCherb* baseia-se em *X1000*, tipo de planta herbácea e na classe de clima definido no Sistema NFDRS. No início do processo *greenup* o *X1000* é igual a *MC1000*. A partir desta fase calcula-se o *X1000* usando a

expressão (2.24). Na equação (2.23) o parâmetro é calculado a partir de coeficientes determinados em função das classes de clima (Tabela 2.2).

$$MCherb = MChrbi + (MChrbp - MChrbi) * Green \quad (2.22)$$

$$MChrbp = HerbGA + HerbGB * X1000 \quad (2.23)$$

$$X1000 = YX1000 + (DIFF * Kwet * Ktemp) \quad (2.24)$$

$$DIFF = MC1000 - YM1000 \quad (2.25)$$

$$Green = \frac{GRNDAY}{(7.0 * c \text{ lim } at)} \quad (2.26)$$

O fator de umidade ($Kwet$) e temperatura ($Ktemp$) está relacionado com a variação do modelo de umidade do combustível no intervalo de tempo de 1000-horas, como é mostrado abaixo.

Se $MC1000 > 0,25$	$Kwet = 1,0$
Se $MC1000 < 0,26$ e $> 0,09$	$Kwet = (0.0333 * MC1000 + 0,1675)$
Se $MC1000 < 0,1$	$Kwet = 0,5$
Se $DIFF \leq 0,0$	$Kwet = 1,0$
Se $(tempmax + tempmin) / 2 \leq 0,5$	$Ktemp = 0,6$ senão $Ktemp = 1,0$

Tabela 2.2: Parâmetro da umidade do combustível herbáceo na fase *greenup*.

Classe Climática	Herb	
	GA	GB
1	-70,0	12,8
2	-100,0	14,0
3	-137,5	15,5
4	-185,0	17,4

sendo $MChrbi$ o conteúdo de umidade do combustível herbáceo anterior ao estágio *greenup*; $X1000$ o modelo de umidade de combustível herbáceo; $GRNDAY$ o número de dias desde o início do estágio *greenup*; $DIFF$ o $MC1000$ no período de 24 horas; $YM1000$ o valor de $MC1000$ anterior; $YX1000$ o valor de $X1000$ anterior; $Kwet$ o fator de umidade (*wetting*); $Ktemp$ o fator de temperatura; $MCbrbp$ o conteúdo de umidade em combustível herbáceo durante o período *greenup*; $Gren$ a fração do período de *greenup* que está sendo calculado $Mcherb$; $HerbGA$ e $HerbGB$ são os parâmetros relacionados com o conteúdo de umidade do combustível herbáceo ou lenhoso no período *greenup* ou utilizado quando $MCherb$ for maior que 100%.

O final do processo de *greenup* e o início da fase *green* são caracterizados pelas seguintes condições: $X1000$ é baixo e $MChrpb$ é maior que 120 %. Desse modo, calcula-se o conteúdo de umidade para plantas herbáceas e anuais utilizando as seguintes expressões:

$$MCherb = ANNTA + ANNTB + X1000 \quad (2.27)$$

$$MCherb = PERTA + PERTB * X1000 \quad (2.28)$$

sendo que o parâmetro $MCherb$ não pode exceder 150% ou ser menor que 30% em plantas perenes; $MCherb$ não pode ser maior que $MCherb$ calculado para predição do dia para plantas anuais e os parâmetros $ANNTA$, $ANNTB$, $PERTA$, $PERTB$ são determinados em função da classe de clima como é mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Parâmetro da umidade do combustível herbáceo na fase *green*.

Classe de Clima	Anual		Perene	
	ANNTA	ANNTB	PERTA	PERTB
1	-150,5	18,4	11,2	7,4
2	-187,7	19,6	-10,3	8,3
3	-245,2	22,0	-42,7	9,8

Na estação de crescimento, a umidade do combustível herbáceo perene tende a decrescer, variando entre 30% e 120 %. Nesta fase, ocorre um deslocamento entre as categorias de combustível morto e vivo indicando uma transição de fase. Esse comportamento é definido como limite de transição, onde o crescimento é completado,

assim como a maturação foliar. Quando a umidade estiver próxima a 3%, assume-se que as plantas herbáceas estão mortas correspondendo à saturação das fibras.

Para vegetação herbácea anual, este processo é diferente. No modelo de esverdeamento, o conteúdo de umidade da vegetação anual não aumenta. A transferência de umidade da categoria viva para morta não ocorre em direção oposta, como se observa na vegetação perene. As equações que descrevem o mecanismo de transferência de umidade no desenvolvimento fisiológico da vegetação são mostradas no Anexo I.

- **Modelo de Umidade do Material Combustível Lenhoso**

O modelo de umidade do combustível lenhoso representa a troca de umidade com o meio em três fases que são: *pregreen*, *greenup*, *green*. Estas fases são determinadas a partir da umidade do combustível no intervalo de tempo de 1000-horas obtido no modelo de combustível morto e em função da classe de clima (Tabela 2.4). Estas fases são apresentadas através das expressões (2.29 – 2.31).

$$MC_{wood} = PREGRN \quad (2.29)$$

sendo MC_{wood} o conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos na fase *pregreen* e $PREGRN$ o conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos na fase dormente.

Tabela 2.4: Parâmetro da umidade do combustível lenhoso na fase *pregreen*

Classe de clima	$PREGRN$
1	50
2	1.60
3	70
4	80

$$MC_{wodp} = woodGA + woodGB * MC1000 \quad (2.30)$$

sendo MC_{woodp} a umidade do combustível lenhoso na fase *greenup*; $woodGA$ e $woodGB$ são determinados em função das classes de clima (Tabela 2.5).

$$MC_{wood} = woodGA + woodGB * MC_{1000} \quad (2.31)$$

sendo MC_{wood} a umidade do combustível lenhoso na fase *green*.

Tabela 2.5: Parâmetro da umidade do combustível lenhoso na fase *green*.

Classe de Clima	woodGA woodGB	
	1	12,5
2	-5,0	8,2
3	-22,5	8,9
4	-45,0	9,8

O passo seguinte no sistema NFDRS é a determinação dos componentes e índices relacionados com incêndio florestal. Entretanto, para o seu cálculo são necessárias as determinações de parâmetros físicos e químicos. Estes parâmetros são ajustados em função do carregamento⁶ do combustível vivo e morto e nas classes de perda de umidade. Nesta seção é apresentado o fundamento, enquanto as expressões são mostradas no Anexo I.

2.3.1.3 - Propriedades Físicas e Químicas da Partícula do Combustível

As propriedades químicas e físicas da partícula do combustível utilizadas no sistema foram definidas originalmente por ROTHERMEL (1972). Estas propriedades são empregadas para descrever a resposta ao estresse ambiental, ou seja, como as características físicas como o tamanho da partícula do combustível e a razão da área da superfície pelo volume afetam o processo de ignição e a taxa de troca de umidade com o meio. As propriedades utilizadas no sistema são: densidade da partícula do combustível, conteúdo mineral efetivo, conteúdo de calor, razão da área da superfície da partícula do combustível pelo volume e umidade extinta.

⁶ carregamento do combustível vivo e morto: é a massa do combustível por unidade de área do leito combustível.

- **Densidade do Material Combustível**

A densidade do material combustível é utilizada para determinar a razão do packing (β) do leito combustível, que por sua vez representa a razão da densidade do leito combustível pela densidade da partícula. Com relação à densidade da partícula do combustível existem valores tabelados para várias espécies de Pinus e Eucalipto dentre outras espécies. Para o cálculo da densidade de massa do leito combustível utilizam-se as expressões (2.32) e (2.33). Ele é obtido a partir da combinação da profundidade do leito combustível com a quantidade de biomassa. Com estes parâmetros obtêm-se a taxa de compactação (*packing*) (equação (2.34)).

$$RHOBED = \frac{(WTOT - W1000)}{prof} \quad (2.32)$$

sendo *RHOBED* a densidade de massa do leito combustível; *WTOT* o carregamento do combustível total; *W1000* o carregamento do combustível na classe de 1000-horas específico para cada modelo de combustível; *prof* a profundidade do leito combustível efetiva em pés.

$$RHOBAR = \frac{((WTOTL * RHOL) + (WTOTD * RHOD))}{WTOT} \quad (2.33)$$

sendo *RHOBAR* a densidade da partícula do combustível; *WTOTL* o carregamento do combustível vivo; *WTOTD* o carregamento do combustível morto; *RHOL* e *RHOD* são densidades da partícula do combustível vivo e morto (*RHOL* e *RHOD* = 32ib/ft³).

$$BETBAR = \frac{RHOBED}{RHOBAR} \quad (2.34)$$

sendo *BETBAR* a taxa de compactação (*packing*).

- **Conteúdo Mineral Total do Material Combustível**

O conteúdo mineral total é a fração da parte do combustível composta de minerais inorgânicos. O conteúdo de mineral inorgânico reduz a combustão do combustível. No sistema NFDRS, é utilizado 5.55 % para as duas classes de combustíveis vivo e morto.

- **Conteúdo Mineral Efetivo do Material Combustível**

O conteúdo mineral efetivo corresponde a certos minerais salinos presentes na massa do combustível. Estes minerais alteram o processo da pirólise formando compostos voláteis. Ainda, indica a presença de cinza de sílica livre que influencia a taxa de degradação térmica e a quantidade de voláteis produzidos. Neste sistema é utilizado o valor do conteúdo mineral efetivo igual a 1 % para as duas classes. Entretanto, existem valores de conteúdo mineral efetivo para diferentes espécies. Com este parâmetro, determina-se o coeficiente mineral do combustível morto e vivo utilizando as seguintes expressões:

$$\text{(morto) } ETYASD = 0.174 * SD^{(-0.19)} \quad (2.35)$$

$$\text{(vivo) } ETASL = 0.174 * SL^{(-0.19)} \quad (2.36)$$

sendo SD e SL são o conteúdo mineral de sílica livre no combustíveis morto e vivo, respectivamente (SD e $SL = 0.01$).

- **Conteúdo de Calor**

O conteúdo de calor é a energia liberada por unidade de área durante a combustão ou pode ser definida como calor de combustão ou aquecimento. Este parâmetro é calculado para cada classe de combustível como é mostrado abaixo. Ele é utilizado para determinar a taxa do número de aquecimento do combustível vivo e morto, como é apresentado nas expressões a seguir:

$$WRAT = \frac{(HN1 + HN10 + HN100)}{HNherb + HNwood} \quad (2.37)$$

$$(1\text{-hora}) \quad HN1 = W1N * \exp(-138.0/SG1) \quad (2.38)$$

$$(10\text{-horas}) \quad HN10 = W10N * \exp(-138/SG10) \quad (2.39)$$

$$(100\text{-horas}) \quad HN100 = W100N * \exp(-138/SG100) \quad (2.40)$$

$$(\text{herbáceo}) \quad HNHerb = WherbN * \exp(-500.0/SGherb) \quad (2.41)$$

$$(\text{madeira}) \quad HNwood = WwoodN * \exp(-500.0/SGwood) \quad (2.42)$$

sendo $WRAT$ a taxa do número de aquecimento do combustível vivo e morto; $HN1$ o número de aquecimento da classe de 1-hora; $HN10$ o número de aquecimento da classe de 10-horas; $HN100$ o número de aquecimento da classe de 100-horas; $HNherb$ o número de aquecimento da classe herbácea; $HNwood$ o número de aquecimento da classe lenhosa; $W1N$, $W10N$, $W100N$, $WherbN$, $WwoodN$ são os carregamentos do combustível referente as classes 1-hora, 10-hora, 100-hora, herbácea, lenhosa; $SG1$, $SG10$, $SG100$, $SGherb$, $SGwood$ referem-se a razão da área da superfície pelo volume das classes de 1-hora, 10-hora, 100-horas, herbácea, lenhosa.

- **Razão da Área da Superfície da Partícula do Combustível pelo Volume**

A razão da área da superfície da partícula do combustível pelo volume é uma das propriedades físicas que descreve o ganho e perda de calor e umidade. Além de indicar a evolução dos gases durante a combustão, que ocorre através da superfície da partícula do combustível. Sendo assim, as partículas de combustível que apresentam valor deste parâmetro alto indicam que a ignição pode ocorrer mais facilmente, enquanto como valor menor é mais difícil iniciar o processo de ignição. Este parâmetro é calculado para cada classe de combustível. Esta etapa do sistema é descrita no Anexo I (equações I.75-I.77).

- **Umidade Extinta do Combustível**

A umidade extinta é o conteúdo de umidade do combustível que o fogo não se propaga. Segundo BROWN (1972) o valor da umidade extinta é determinado em função do nível de compactação do leito combustível, tamanho da partícula, velocidade do vento e declividade. Assim, estabeleceu-se um valor de 12 % para vegetação de gramíneas e 40% para serrapilheira de conífera.

Na seção anterior descreveram-se algumas propriedades do combustível, que são importantes para modelagem do comportamento do fogo e para determinação do índice de risco.

Estes parâmetros relacionados com o combustível são utilizados para determinar os componentes do fogo e os seus índices. Para sintetizar esta variedade de parâmetros dentro de um único valor característico para ser empregado no modelo de incêndio, utiliza-se um método de peso, relacionando a taxa da área da superfície pelo volume com as classes de combustível. Assim, pode-se tratar o leito combustível como uma composição de arranjos que consiste de vários tamanhos de partículas, vivos e outros mortos. Para tal, usa-se o conceito de unidade de célula de combustível com objetivo de facilitar a compreensão da distribuição das classes de tamanho do combustível. A unidade da célula de combustível é o menor volume do combustível dentro de um estrato de profundidade média que tem suficiente biomassa para representar estatisticamente o combustível em um conjunto complexo. Para obter os componentes e índices, é necessário ajustar e determinar a influência dos parâmetros em cada classe de combustível. Este ajustamento dos parâmetros com o carregamento e os pesos é mostrado no Anexo I (equações I.83-I.110).

Os componentes do comportamento do fogo calculados são: velocidade de propagação, energia liberada e ignição. Estes componentes são determinados a partir dos pesos e das áreas de superfície das classes de combustível mais predominante. Com a determinação desses valores, pode-se agora obter os índices que são: índice de queima, índice de ocorrência e índice de carga de incêndio. Na seção a seguir mostra-se a descrição dos componentes e dos índices relacionados com o comportamento do incêndio.

2.3.1.4 – Componentes e Índices do Comportamento do Fogo

- **Componente de Propagação**

O componente de propagação (*spread component – SC*) é definido como a velocidade de avanço da propagação do calor do fogo, ou seja, é o tempo que leva uma frente de um incêndio de estado constante para percorrer uma determinada área (metros/min ou pés/min) (DEEMING, 1977). Para a sua determinação, são necessários os parâmetros de intensidade de reação, fluxo de propagação sem vento, coeficiente de vento e declividade. A obtenção destes parâmetros é mostrada no Anexo I. Este componente é utilizado no cálculo do índice de queima e no componente de ignição (Figura 2.1). A expressão (2.43) representa o cálculo da velocidade de propagação da frente de incêndio.

$$R = \frac{IR * ZETA * (1.0 + PHISLP + PHIWND)}{HTSINK} \quad (2.43)$$

$$SC = R \quad (2.44)$$

sendo *IR* a intensidade de reação; *Zeta* a taxa de fluxo de propagação sem vento; *PHISLP* o coeficiente de declividade; *PHIWND* o coeficiente do vento; *HTSINK* a fonte de calor e *SC* o componente de propagação.

- **Componente de Energia Liberada**

O componente de energia liberada (*energy release component – ERC*) está relacionado com a energia liberada por unidade de área dentro da chama, que representa o potencial da intensidade da linha de fogo. A variação diária deste parâmetro ocorre devido à mudança da umidade contida no combustível (vivo e morto). Ela baseia-se na taxa da área de superfície pelo volume e o tempo de resistência da frente da chama. O desenvolvimento da expressão para o cálculo do componente de energia liberada ou intensidade da linha de fogo é apresentado no Anexo I. Este parâmetro é utilizado para a determinação do índice de queima (Figura 2.1).

$$ERC = (0.04 * IRE * TAU) \quad (2.45)$$

sendo *IRE* a intensidade de energia liberada e *TAU* o tempo de resistência da frente da chama.

$$IRE = GMAOPE * ((FDEADE * WDEDNE * HD * ETASD * ETAMDE) + (FLIVEE * WLIVNE * HL * ETASL)) \quad (2.46)$$

$$TAU = \frac{384}{SGBRT} \quad (2.47)$$

- **Componente de Ignição**

O componente de ignição (*ignition component - IC*) é calculado a partir da probabilidade de ignição, ou seja, é a probabilidade que uma fagulha em contato com o combustível inicie um incêndio. Este componente é dividido em duas partes: a primeira refere-se à probabilidade que uma fagulha em contato com o combustível inicie um incêndio $P(I)$ e a segunda corresponde à probabilidade que o incêndio ocorra na presença de um foco de fogo $P(F/I)$. O cálculo deste componente é mostrado no Anexo I. Ele é usado no cálculo do índice de ocorrência de causa antrópica (Figura 2.1).

O componente de ignição é calculado a partir da probabilidade de ignição, ou seja, é a probabilidade que uma fagulha em contato com o combustível inicie um incêndio. Este componente é dividido em duas partes: a primeira refere-se a probabilidade que uma fagulha em contato com o combustível inicie um incêndio $P(I)$ e a segunda corresponde a probabilidade que o incêndio ocorra na presença de um foco de fogo $P(F/I)$.

O $P(I)$ é uma função da quantidade de calor necessária para produzir uma ignição. Em condições onde $P(I)$ é igual a 100 indica que o conteúdo de umidade do combustível no intervalo de tempo de 1-hora (*MC1*) é aproximadamente de 1.5. Para $P(I)$ igual a zero o *MC1* é aproximadamente de 25.0 %.

O primeiro passo para determinar o componente é calcular o calor necessário para levar a partícula de combustível fino com uma dada temperatura inicial para temperatura de ignição. Para isto calcula-se calor de ignição (Q_{ig}).

$$Q_{ig} = 144.5 - (0.266 * tempprm) - (0.00058 * tempprm^{2.0}) - (0.01 * tempprm * MC1) + (18.54 * (1.0 - \exp(-0.151 * MC1))) + 6.4 * MC1 \quad (2.48)$$

sendo $tempprm$ a estimativa da temperatura do ar imediatamente em contato com o combustível.

Na fase intermediária do processo de ignição.

$$CHI = (344.0 - Q_{ig}) / 10.0 \quad (2.49)$$

$$P(I) = (CHI^{3.6} * PNORM3 - PNORM1) * 100.0 / PNORM2 \quad (2.50)$$

sendo CHI uma variável intermediária usada na determinação da probabilidade de ignição e $PNORM$ um fator escalar utilizado quando se assume que $P(I)$ igual a 100 quando $MC1$ for 15% e zero se $MC1$ for 25%.

O parâmetro $P(F/I)$ é determinado em função do componente de propagação.

$$SCN = 100.0 * SC / SCM \quad (2.51)$$

sendo SCN um parâmetro relacionado com o modelo de combustível específico.

$$P(F/I) = SCN^{0.5} \quad (2.52)$$

$$IC = (0.10 * P(I) * P(F/I)) \quad (2.53)$$

- **Índice de Queima**

O índice de queima (*burning index – BI*) refere-se à quantidade potencial de esforço necessário para conter um incêndio em um determinado tipo de combustível em uma área específica. Este índice é derivado dos componentes da velocidade de propagação e da energia liberada. Para se calcular o índice de queima, os componentes da velocidade de propagação e os componentes da energia liberada são combinados em uma equação originalmente desenvolvida por BYRAM (1959), que calcula o comprimento da chama. Desde modo, assume-se que o índice de queima é numericamente equivalente a 10 vezes o comprimento da chama.

$$BI = 3.01 * (SC * ERC)^{0.46} \quad (2.54)$$

O índice de ocorrência refere-se à incidência potencial de incêndios dentro de uma determinada área. Ele é derivado do risco quando uma área é exposta a fontes de ignição, aos componentes da ignição e a probabilidade de incêndios provenientes de fagulhas em combustíveis finos (combustíveis constituídos por galhos com diâmetro menor ou igual a 1.0 cm, folhas, líquens, musgos e gramíneas todas no estado seco).

Outros índices podem ser usados para incluir fatores não relacionados diretamente à física da combustão. Estes índices referem-se à incidência potencial de incêndios dentro de uma determinada área. Ele é derivado do risco quando uma área é exposta a fontes de ignição e a probabilidade de incêndios provenientes de fagulhas em combustíveis finos (combustíveis constituídos por galhos com diâmetro menor ou igual a 1.0 cm, folhas, líquens, musgos e gramíneas em estado seco).

No sistema NFDRS, os índices de ocorrência são classificados de duas formas: primeira refere-se ao índice de ocorrência por causa antrópica e segunda por descarga elétrica (Figura 2.1).

- **Índice de Incêndio por Causa Antrópica e por Descarga Elétrica**

O índice de ocorrência de incêndio por causa antrópica (*humam caused fire occurrence – MCOI*) é uma razão numérica que reflete o número de focos de fogo que podem ocorrer proveniente de ação antrópica em um dado dia. Este índice baseia-se no risco de incêndio por ação de atividade humana (*MRI*) e o componente de ignição. Se este índice é igual a 20 significa que o potencial é de que ocorram dois focos de fogo derivados de causa antrópica por milhão de acre em um dia, se o leito combustível for susceptível à ignição. O índice por descarga elétrica (*lightning occurence index – LOI*) é uma razão numérica que reflete o número de focos de fogo que podem ocorrer provenientes deste fenômeno. Este índice é obtido a partir do nível de atividade de descarga elétrica e o componente de ignição. Para o seu desenvolvimento, é necessário o conhecimento local da frequência deste fenômeno atmosférico e o histórico de incêndios ocasionados por esta causa. O parâmetro *MCOI* é definido como:

$$MCOI = (0.01 * MRI * IC) \quad (2.55)$$

- **Índice de Resistência do Fogo**

O índice de resistência do fogo (*IRF*) (*fire load index – FLI*) baseia-se nos parâmetros calculados no sistema NFDRS. Varia de 1 a 100 e representa o esforço máximo necessário para conter todos os prováveis fogos que ocorram na área durante um período. Deve ser relacionado localmente, para melhor representatividade, com esforços reais para conter o fogo. Ele é calculado utilizando os parâmetros de índice de queima e índice de ocorrência de incêndio por causa antrópica. O índice de ocorrência por descarga elétrica nesse trabalho é igual à zero. Este índice é o parâmetro utilizado para indicar o risco de incêndio nesse trabalho (Figura 2.1) e é calculado por meio da seguinte expressão:

$$IRF = 0.71 \sqrt{BI^2 + (LOI + MCOI)^2} \quad (2.56)$$

A calibração desses parâmetros não foi possível ser realizada devido a pouca quantidade de dados e principalmente durante o desenvolvimento desse trabalho não foi

possível à realização de nenhum experimento para o ajuste de parâmetros tais como: umidade do material do combustível e propriedades físicas e químicas deste material.

2.3.2 - Índice de Risco de Incêndios no Canadá

O índice meteorológico de incêndios florestais do Canadá (*FWI - Fire Weather Index*) consiste numa classificação numérica do potencial da intensidade de incêndios em um determinado tipo de combustível. Este índice é composto por seis componentes baseados na dinâmica do vento e no conteúdo de umidade do combustível. Nos três primeiros componentes, é analisado o efeito das condições meteorológicas sobre o conteúdo de umidade dos vários tipos de combustíveis em uma camada da floresta. Esta camada corresponde ao combustível rasteiro, isto é, folhas secas, pequenos ramos, húmus, árvores de até 2 metros, vegetação herbácea (gramíneas) e serrapilheira ou *litter*. Os três últimos componentes analisam a quantidade de umidade acumulada e as características do comportamento do incêndio (STOCKS *et al.*, 1989, PYNE *et al.*, 1996, VAN WAGNER, 1987). Os seis componentes são os seguintes:

1. quantidade de umidade do combustível fino (*Fine Fuel Moisture Code - FFMC*) – descreve a classificação numérica do conteúdo de umidade da camada orgânica e dos combustíveis finos existentes na floresta. Este parâmetro é baseado na temperatura, umidade relativa, vento e precipitação. Ele indica a facilidade de ignição;
2. quantidade de umidade da turfa (*Duff Moisture Code - DMC*) – corresponde à classificação numérica para a umidade média existente na camada orgânica abaixo da serrapilheira, aproximadamente 7 centímetros de profundidade;
3. grau de secura (*Drought Code - DC*) – refere-se à classificação numérica da umidade média existente nas camadas orgânicas compactas e profundas. Esta quantificação deve ser utilizada como um guia nas atividades de supressão e preparação de longo prazo, em grandes áreas. Indica incêndio a nível de solo;
4. índice de propagação inicial (*Initial Spread Index - ISI*) – refere-se à classificação numérica da velocidade de propagação do incêndio, imediatamente após a ignição, em um determinado tipo de material combustível;
5. ajuste da quantidade de umidade da turfa (*Build-Up Index - BUI*) – refere-se à classificação numérica da quantidade de material combustível disponível para a

combustão. Esta quantificação é adequada para uso como um guia nas atividades de controle e preparação de curto prazo;

6. índice meteorológico de incêndios (*Fire Weather Index* - FWI) – refere-se à classificação numérica da intensidade potencial do incêndio em um determinado tipo de combustível. Esta quantificação é um guia para as atividades diárias de preparação e supressão.

A partir da comparação dos sistemas NFDRS e CFFDRS realizada por VAN WAGNER (1966) e PYNE *et al.* (1996), pode-se apresentar as seguintes diferenças baseadas nas condições utilizadas pelos modelos para estimar o índice: floresta aberta - floresta fechada, tipos de combustível (20 modelos de combustível - combustível geral), condições do combustível (umidade da madeira - umidade do litter na superfície) e tipo de modelo físico (troca de umidade aspecto físico - dados de campo e incêndios experimentais).

2.3.3 - Índice de Risco de Incêndios de Monte Alegre

A fórmula de Monte Alegre *FMA* baseia-se no comportamento da umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica. O mesmo é acumulativo, para o cálculo é utilizada a seguinte expressão:

$$FMA = 100 \sum_{i=1}^n \frac{1}{UR_i} \quad (2.57)$$

Para a determinação do índice através da fórmula de Monte Alegre, utiliza-se a (UR_i) umidade relativa do ar, em % observada às 13 horas, sendo corrigida em função da precipitação, conforme mostrado na Tabela 2.6 (número de dias sem qualquer precipitação maior que 10 mm).

Tabela 2.6: Restrição ao somatório do índice de Monte Alegre, de acordo com a quantidade de chuvas do dia.

Chuvas do dia (mm)	Modificações no Cálculo
<2,4	Nenhum
2,5 a 4,9	diminuir 30% no valor de FMA calculado na véspera e somar (100/H) do dia
5,0 a 9,9	diminuir 60% no valor de FMA calculado na véspera e somar (100/H) do dia
10,0 a 12,9	diminuir 80% no valor de FMA calculado na véspera e somar (100/H) do dia
>12,9	Interromper o cálculo (FMA=0), iniciando no dia seguinte.

Interpretação do grau de risco estimado é feita por uma escala de risco (Tabela 2.7).

Tabela 2.7: Escala de risco da Fórmula de Monte Alegre.

Valor de FMA	Grau de Perigo
<1,0	Nenhum
1,1 a 3,0	Pequeno
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20	Alto
>20,0	Extremo

2.3.4 - Índice de Risco de Incêndios de Angstron

O índice de risco de Angstron (Ang), não acumulativo, é calculado a partir da umidade relativa e da temperatura do ar, definido como segue:

$$Ang = (0.05 * UR_i) + 0.1(T_i - 27) \quad (2.58)$$

Sempre que o valor de Ang for menor do que 2,5 haverá risco de incêndio, isto é, as condições atmosféricas do dia estarão favoráveis à ocorrência de incêndios.

2.3.5 - Índice de Risco de Incêndios de Nesterov

O índice de risco de incêndios de Nesterov, desenvolvido na Rússia e aperfeiçoado na Polônia, é um modelo acumulativo, e o somatório é modificado de acordo com a quantidade de chuva incidente (Tabela 2.8), calculado pela expressão:

$$IN = \sum_{i=1}^n (d_i T_i) \quad (2.59)$$

sendo $d_i = e_i \left(1 - \left(\frac{UR_i}{100} \right) \right)$

sendo d a deficiência de umidade, em milibar e e_i a pressão real de vapor da água, em milibar; variáveis observadas às 13 horas.

Tabela 2.8: Restrição ao somatório do índice de Nesterov, de acordo com a quantidade de chuvas do dia.

Chuvas do dia (mm)	Modificações no Cálculo
<2,0	Nenhum
2,1 a 5,0	diminuir 25% no valor de IN calculado na véspera e somar (d*T) do dia
5,1 a 8,0	diminuir 50% no valor de IN calculado na véspera e somar (d*T) do dia
8,1 a 10,0	Abandonar o somatório anterior e recomeçar novo cálculo, isto é, IN=(d*T) do dia
>10,0	Interromper o cálculo (IN=0), iniciando no dia seguinte.

Interpretação do grau de risco estimado é feita por uma escala de risco (Tabela 2.9).

Tabela 2.9: Escala de risco do índice Nesterov.

Valor de <i>IN</i>	Grau de Perigo
<300	Nenhum
301 a 500	Pequeno
501 a 1000	Médio
1001 a 4000	Alto
>4000	Extremo

2.4 – Materiais e Métodos

2.4.1 - Área de Estudo

O estudo foi realizado na área do Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca), segundo o decreto nº 60.163/67, possuindo cerca de 3.200 ha. O PARNA-Tijuca localiza-se no maciço da Tijuca e representa 35% da área total desta unidade geomorfológica. O maciço ocupa uma área total de 11.870 hectares na porção oriental do município do Rio de Janeiro entre os paralelos 22°55' e 23°00' sul e meridianos 43°20' e 43°10' oeste, constituindo parte dos maciços costeiros brasileiros (BACA, 2002). O maciço da Tijuca é uma unidade fisiográfica situada dentro do sítio urbano da cidade do Rio de Janeiro, que se caracteriza como um dos grandes balizadores, juntamente com o mar, do processo de expansão da ocupação da cidade. Ele é marcado por um relevo montanhoso, que pode ser subdividido em cinco grandes subsistemas de drenagem (setores), os quais possuem distintos arranjos a nível biótico, abiótico e de ocupação humana. De uma maneira geral, estes setores encontram-se bastante alterados, face às condições de degradação ambiental provenientes do desmatamento, queimadas e ocupação desordenada e, hoje, com boa parte de seus rios em regime temporário. Estes cinco subsistemas ou setores (Figura 2.2) drenam em direção à Baía de Guanabara (setores 1 e 2), à lagoa da Tijuca ou de Jacarepaguá (setores 4 e 5), à lagoa Rodrigo de Freitas ou diretamente para o oceano (setor 3) (FERNANDES *et al.*, 1998).

Apesar de grande parte da área florestada do maciço da Tijuca estar protegida por lei, já que o PARNA-Tijuca abrange mais de 50% desta área, a floresta encontra-se extremamente ameaçada por estar situada no núcleo urbano da metrópole do Rio de Janeiro. As maiores ameaças são o processo de favelização e a ocorrência de queimadas.

A região (PARNA-Tijuca) é caracterizada por dois períodos climáticos: estação das chuvas que se estende de outubro a março, quando a temperatura média é cerca de 25°C, e a estação seca de abril a setembro, quando a temperatura alcança 19°C (OLIVEIRA *et al.*, 1995). A precipitação média anual é aproximadamente 2500 mm (COELHO NETTO, 1985).

Para a análise do PARNA-Tijuca, é considerada uma área além dos seus limites. A área de entorno foi incluída, pois as ocorrências nas proximidades dos limites de uma unidade de conservação podem afetar, diretamente, os ecossistemas localizados no seu interior. Desde modo, neste trabalho, é estabelecida uma área a partir da cota 40m.

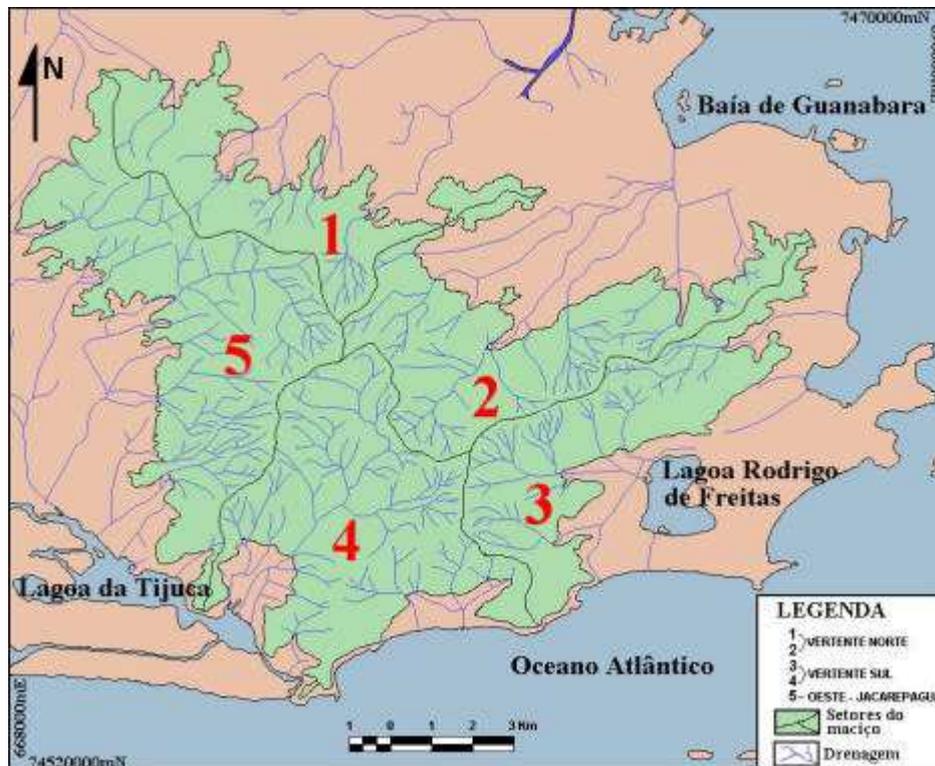


Figura 2.2: Mapa de localização dos sub-sistemas hidrográficos do maciço da Tijuca, divididos em cinco sub-sistemas, conforme a legenda.

Fonte: FERNANDES, 1998.

2.4.2 – Materiais

2.4.2.1 – Coleta de Dados

A primeira etapa do trabalho correspondeu à instalação de duas plataformas de coleta de dados – PCD's para a obtenção de dados meteorológicos e do estado da vegetação *in situ*. A definição da localização das áreas de instalação, com o objetivo de representar o comportamento dos modelos em dois ecossistemas diferentes, baseou-se nos estudos realizados por FERNANDES (1998). Neste estudo, foram mapeadas as áreas de maior potencialidade de ocorrência de eventos de focos de fogo no maciço da Tijuca, utilizando informações de orientação das encostas, a forma da encosta e o tipo de cobertura vegetal. O estudo tomou como base ainda as áreas onde se situam as linhas de transmissão da LIGHT (LIGHT Serviços de Eletricidade S.A.).

Assim, selecionou-se duas áreas para instalação das plataformas de coleta de dados – PCD's: a primeira localiza-se na torre do Sumaré (22°56'13" e 43°13'27") e a segunda, na torre do Horto (22°58'09" e 43°14'13") (Figura 2.3). As áreas são compostas por um mosaico de ecossistemas distintos no tipo de sucessão ecológica e na posição das encostas. A área de estudo localizada no Horto é ocupada por florestas (secundárias) com as encostas voltadas para o sul. O Sumaré é formado por um ecossistema degradado dominado por gramíneas, sobretudo pelo capim colônio (*Panicum maximum*) e com encostas voltadas para o Norte. Ainda nesta área há uma ocupação urbana na base.

Segundo OLIVEIRA *et al.* (1995), as encostas voltadas para o sul possuem serrapilheira em média 41,9% mais úmida que as voltadas para o norte. Além disso, esses autores ainda afirmam que a perda desta umidade também se dá muito mais rápido nas encostas voltadas para o norte, pois as voltadas para o sul retêm a umidade 1,6 vezes mais que a norte. Esta variação de umidade se reflete basicamente em função dos diferentes índices de temperatura destes dois tipos de encostas, visto que as encostas voltadas para o norte são significativamente mais quentes devido à maior incidência de calor que as voltadas para o sul, com 98% de ocorrência de temperaturas máximas

naquelas encostas. As temperaturas mínimas também ocorrem em grande maioria nas encostas norte (86%), o que deve ser atribuído a maior umidade relativa nas de sul, face ao maior período de deposição de orvalho que atua como um efeito “tampão” reduzindo as temperaturas extremas (FERNANDES, 1998). Desde modo, espera-se que o setor do Sumaré apresente maior probabilidade de ocorrência de focos de fogo, uma vez que há predominância de encostas voltadas para o norte.

As PCD's foram instaladas pela UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) junto à LIGHT, utilizando as torres de transmissão como suporte para os sensores, em outubro de 2002. As torres escolhidas foram a 56-TSU-JP localizada no Horto e a 02-Ramal Jardim Botânico localizada no Sumaré. A Figura 2.3 mostra a área urbana da cidade do Rio de Janeiro e a disposição das PCDs no maciço da Tijuca. A linha representa o limite geográfico entre as áreas do Horto e Sumaré assumidas neste trabalho. Em cada torre foram instalados os seguintes conjuntos de instrumentos: anemômetro, painel solar, pluviômetro, sensor de temperatura do ar e umidade relativa, sensor de temperatura e umidade do combustível e a plataforma de coleta de dados (bateria, transmissor ARGOS/SCD, *datalogger* (SCD-2)) (Figura 2.4).



Figura 2.3: Os pontos representam a localização das PCD's nos setores do Horto e do Sumaré, respectivamente, dentro da área urbana da cidade do Rio de Janeiro.

Adaptado da Fonte: FERNANDES, 1998.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.4: (a) Torre 56-TSU-JP localizada no Horto; (b) Torre 02-Ramal Jardim Botânico localizado no Sumaré; (c) Plataforma de coleta de dados instalado na torre da Light a uma altura em torno de 4 metros no Sumaré (d) Disposição do sensor de temperatura e umidade do combustível instalado na torre da Light no Sumaré.

As PCD's são compostas por um dispositivo automático que transmite ao Satélite Brasileiro de Coleta de Dados (SCD-2) as informações armazenadas no *datalogger*. As informações são transmitidas pelo satélite para o Centro de Missão de

Coleta de Dados (CMCD), no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (SP), onde os dados são processados e enviados a UFRJ (Figura 2.5).

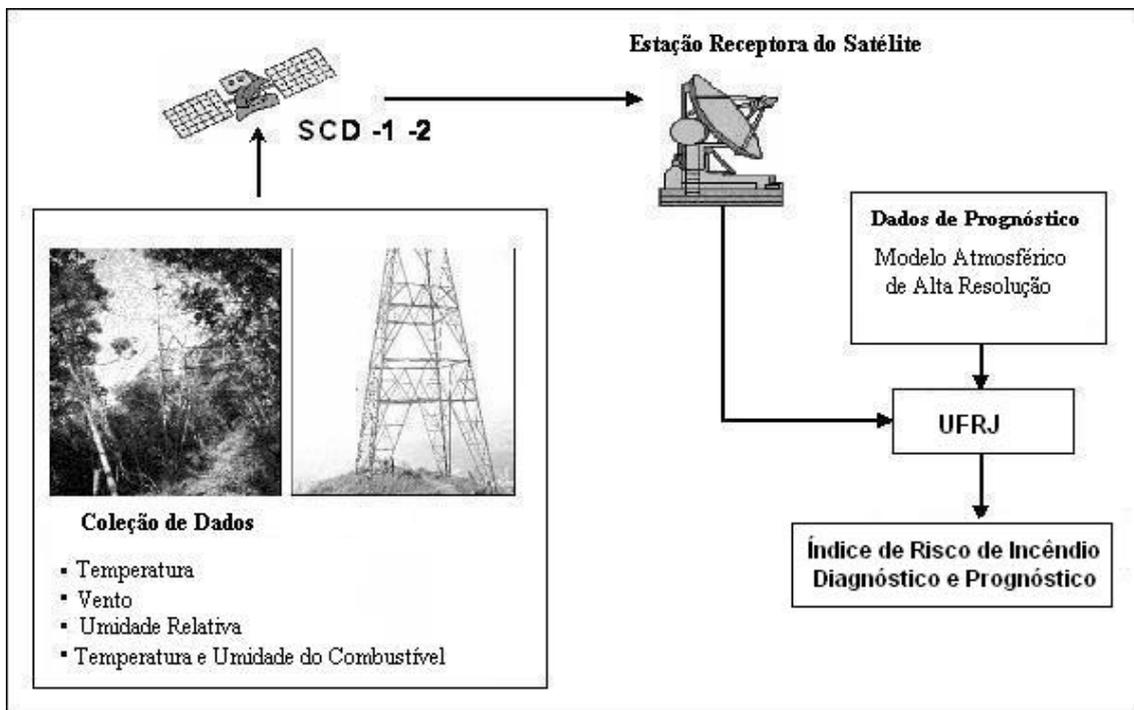


Figura 2.5: Fluxograma do procedimento para obtenção do risco de Incêndio.

Neste trabalho, ainda são utilizados os dados horários de precipitação obtidos das estações pluviométricas da Fundação GeoRio (estações Jardim Botânico e Tijuca) e os dados gerados pelo Laboratório de Prognóstico em Mesoescala do departamento de Meteorologia da UFRJ, ambos no período de 2003 e 2004. Eles são aplicados como base de referência para o acompanhamento dos dados registrados das PCD's instaladas nos setores Horto e Sumaré.

2.4.3 – Método

Um dos objetivos deste trabalho é apresentar um sistema experimental para determinação de valores de risco de fogo (diagnóstico e prognóstico) como proposta para auxiliar as brigadas de combate ao fogo no Parque Nacional da Tijuca. O diagrama da Figura 2.5 mostra a metodologia que é composta de três etapas principais, a saber: 1) coleta de dados diagnósticos; 2) estimativa de dados prognósticos e 3) cálculo do índice

de risco de incêndio (diagnóstico) (CARAPIÁ *et al.*, 2003). Os dados de prognóstico não são tratados no escopo deste trabalho.

2.4.3.1 – Determinação dos Índices de Risco de Incêndio

Os índices são avaliados diariamente por meio de medidas *in situ* de variáveis meteorológicas adquiridas pelas PCD's. Estas fornecem os seguintes dados: dia e horário das medidas, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos a 10m acima do solo e temperatura e umidade do combustível. Com estes dados, são calculados os índices de risco de incêndio acumulativos e não acumulativos: Fórmula de Monte Alegre (*FMA*), CFFDRS (*FWI*), NFDRS (*IRF*) e Nesterov (*IN*), Angstrom (*Ang*), descritos na revisão bibliográfica.

Os registros dos focos de fogo ocorridos no maciço da Tijuca, no período de 2003 e 2004, foram levantados junto à Brigada de Combate ao Fogo do Alto da Tijuca. As informações coletadas dos registros dos focos de fogo incluem data, lugar, horário, duração, extensão, tipo de vegetação e causas de cada ocorrência de fogo. Entretanto, a maior parte das informações dos eventos ocorridos não é registrada. Neste período, foi quantificado e analisado o número de incêndios ocorridos e determinou-se o período de maior incidência de incêndios.

No NFDRS, o Índice de Resistência do Fogo (*IRF*) é o parâmetro utilizado para indicar o risco de incêndio, mostrado na Figura 2.1. Para o cálculo do *IRF*, usou-se o Programa *WeatherPro3* (REMSOFT, 2002). A primeira etapa do cálculo *IRF* é a descrição adequada da área para obter resultados com boa representatividade. Na descrição, são necessárias as seguintes informações: tipo de modelo de combustível; classe de inclinação; tipo de vegetação; classe climática e a precipitação anual. Este sistema possui como característica permitir a regionalização através do uso de dados obtidos via plataforma de coleta de dados, que são distribuídas de forma a representar os ecossistemas presentes na área de interesse. A rede de PCD's é responsável pelo monitoramento contínuo das variáveis ambientais. É necessário também o fornecimento *a priori* da altitude, latitude e as informações citadas anteriormente para representar a

localização de cada PCD da rede. O tipo de modelo de combustível deve ser compatível com a cobertura da vegetação presente nas áreas do Horto e Sumaré.

O grau de risco do resultado de diagnósticos do *IRF* é apresentado em classes de baixo, médio, alto e extremo assumindo o intervalo de 0% -24%, 25% - 49%, 50% - 74% e 75% - 100%, respectivamente. Deste modo, considerando que dado um dia com *IRF* registrando 70, indica que 70% de todas as fagulhas de fogo em contato com o combustível irão exigir uma ação de controle.

Antes da realização da análise, descrita na seção 2.5, foi necessária a preparação dos dados, pois os índices de risco apresentam-se em escalas diferentes. Para isto, realizou-se uma normalização dos valores, de modo a que ficassem compreendidos na faixa de valores entre 0 e 1, viabilizando sua análise. Existem vários métodos para se fazer isso. Talvez o mais comum dos métodos de normalização é somar os quadrados de cada elemento, tirar a raiz quadrada da soma, e então dividir cada elemento pela norma. Este é chamado de Normalização Euclidiana. Um segundo método de normalização de um vetor de dados é simplesmente somar todos os elementos do vetor e então dividir cada número pela soma. Deste modo, a soma dos elementos normalizados vale 1.0, e cada elemento tem um valor que representa percentualmente a sua contribuição nessa soma. Um terceiro método para normalizar um vetor é dividir cada elemento pelo valor do elemento de máximo valor. Este tipo de normalização é utilizado desde quando se deseja minimizar o custo de processamento (AURÉLIO *et al.*, 1999).

A frequência dos índices foi determinada através da quantificação do número de dias que os índices atingiram determinado grau da escala de classificação. Para se determinar a frequência dos índices por níveis de uma escala, denominada escala de classificação, observou-se os valores alcançados pelos quatro índices em um mesmo dia, classificando-os em uma escala de 1 a 4. O resultado do diagnóstico obtido através dos índices é determinado através dos dados meteorológicos coletados nas PCD's do Horto e Sumaré descritos anteriormente. Os dados coletados nas PCD's são com base horária. O tempo de execução dos índices *IRF* e *FWI* é horário, enquanto os índice *FMA*, *IN* e *Ang* são diários, sendo o horário estipulado para a execução às 13:00 horas.

Ainda, para a utilização do modelo NFDRS, realizou-se uma calibração a partir de uma série de simulações conduzidas com dados de PCD`s adquiridos junto ao INPE e do conhecimento da área. Entretanto, ressalta-se para o local da realização do trabalho são necessários estudos mais detalhados do comportamento das variáveis e parâmetros que compõem esse modelo.

2.5 – Análise dos Resultados

2.5.1 - Índice de Resistência do Fogo (*IRF*) e Dados de Focos de Fogo

Os resultados e análises realizados referem-se somente aos dados de diagnósticos armazenados pelas plataformas de coleta de dados (PCD's). As Tabelas 2.10 a 2.13 mostram um resumo dos resultados obtidos através das PCD's nos setores do Horto e Sumaré, durante o período de fevereiro a dezembro em 2003 e 2004, respectivamente. Nas Tabelas 2.10 a 2.13, são apresentados os dados das 13:00 horas, que é o horário próximo do valor estatístico máximo da temperatura do ar e mínimo da umidade relativa do dia. A proposta é analisar os resultados dos índices de *IRF* e *FMA*, que foram normalizados a partir dos dados das PCD's no período de estudo. Para tal, foram gerados resultados de média mensal dos índices e também é mostrado o valor mensal da umidade relativa mínima registrada em ambas PCD's às 13:00 horas. Ainda nestas Tabelas, é apresentada a distribuição dos números dos dias em relação ao grau de nível de risco (baixo, médio, alto e extremo).

Nas Tabelas 2.10 a 2.13, verifica-se que nos anos de 2003 e 2004 o período de menor índice de precipitação correspondeu aos meses de fevereiro, junho, julho de 2003 e em 2004 foram os meses de junho, agosto e setembro no Sumaré. Os menores índices de precipitação registrados no Horto foram fevereiro, junho e outubro neste período de estudo.

As Tabelas 2.10 e 2.11 apresentam as frequências dos níveis alto e extremo do *IRF* no Sumaré e no Horto. Pode ser observado que as altas frequências de *IRF* do nível alto concentram-se durante a estação seca, considerada período crítico. A estação seca no maciço da Tijuca ocorre aproximadamente de abril a setembro, enquanto a estação de chuva ocorre aproximadamente de outubro a março. Sendo assim, é analisado o período mais crítico e onde apresentou o maior número de ocorrências de focos de fogo registrado pelo Batalhão do Corpo de Bombeiros da Floresta da Tijuca nos anos de 2003 e 2004.

Na Tabela 2.10, analisando os resultados do *IRF* no setor do Sumaré, detecta-se de junho a agosto de 2003, 28% dos dias foram classificados como alto ou extremo grau de risco de incêndios (27% em junho, 39% em julho e 19% em agosto). Em 2004, verifica-se de junho a agosto, somente 13% dos dias foram classificados como alto grau de risco de incêndios (24% em junho, 10% em julho e 19% em agosto). Na Tabela 2.11, referente aos meses de junho a agosto de 2003 no Horto, verifica-se que os índices não atingiram a classe de extremo. Neste período, foram registrados 10% em junho, 23% em julho e 19% em agosto de dias classificados com alto grau de risco de incêndio. Em 2004, no mesmo período no Horto, registraram cerca de 14% de dias classificados como alto grau de risco (17% em junho e 26% em julho).

Com estes resultados, pode ser observado que os valores máximos têm ocorrido em ambas as áreas em julho e, em particular, no Sumaré no dia 9 de julho de 2003, quando a umidade relativa, temperatura do ar, umidade e temperatura do combustível foram registrados 34%, 27.5°C, 11% e 36.3°C, respectivamente. A Figura 2.6 apresenta a variação do *IRF* horário para o Sumaré e Horto dos dados das PCD's durante 153 horas em julho de 2003. Observa-se que os valores do *IRF* no setor do Horto são normalmente menores que os do Sumaré. Assim, verifica-se que o ciclo diurno de *IRF* no Sumaré é muito evidente devido a grandes mudanças diurnas da temperatura e umidade relativa. No Horto, as mudanças de temperatura e a umidade são relativamente pequenas quando comparados aos dados do Sumaré.

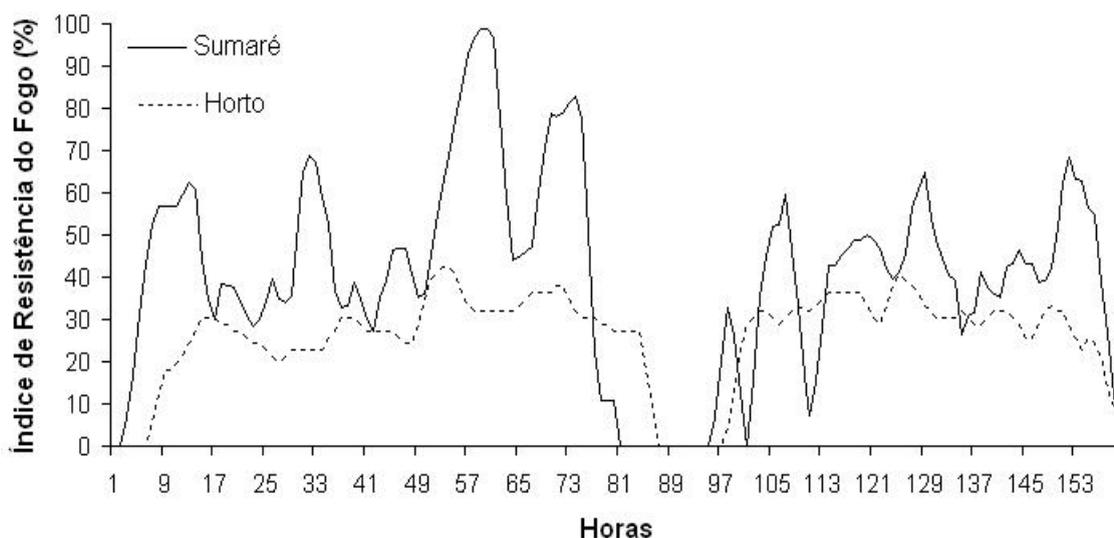


Figura 2.6: Variação horária do *IRF* nas áreas do Sumaré e Horto no período de 153 horas em julho de 2003.

Também na Figura 2.6 é mostrado o comportamento do ciclo do *IRF* horário do Sumaré e do Horto. Observa-se também que as mudanças das curvas do *IRF* do Horto e Sumaré são bastante diferentes. Isto sugere uma correlação do evento do fogo e níveis de *IRF*, considerando o total de dias com níveis de *IRF* correspondente a médio, alto e extremo e, respectivamente, os dias com registros de eventos de fogo (Tabela 2.10 e 2.11). É importante mencionar quando a probabilidade do *IRF* é calculada como médio, alto ou extremo não significa que haja fogo, mas a probabilidade, de acordo com o nível de *IRF*, o fogo exigirá uma ação de supressão se uma fagulha entrar em contato com o combustível. A brigada de combate tem registros de 48 casos de ocorrência de fogo durante o período de estudo e cerca de 55% destes casos ocorreram no setor do Sumaré (Tabela 2.10 e 2.11). A principal razão para isto é que os dados do Sumaré representam um ambiente mais degradado, conforme mencionado na seção 2.4.2.1. Além disso, o setor do Horto é influenciado pela umidade que é trazida do oceano pelos ventos que ocorrem na face a barlavento predominante da direção sudeste.

A maioria dos eventos de fogo no maciço da Tijuca foi combatida quando o nível do *IRF* foi calculado no intervalo de médio a extremo grau de risco de incêndio. Em poucos casos, na área do Sumaré, o nível do *IRF* calculado era baixo e o evento do fogo foi registrado pela brigada de fogo. Uma das principais causas é a ação antropogênica onde o fogo é provocado por queda de balões ou queima de lixo (MATOS, *et al.*, 2002).

Tabela 2.10: Resumo dos resultados *IRF* proveniente da PCD do Sumaré no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.

Ano	Mês	UR (%) (min/ 13h)	<i>IRF</i> (%) (média mensal 13h)	Número de dias com níveis de <i>IRF</i>				Dia com registro de evento de fogo
				baixo	médio	alto	Extremo	
2003	02	35	27	10	3	4	1	8
2004	02	58	3	28	1	-	-	0
2003	03	39	12	25	4	2	-	5
2004	03	57	3	31	0	-	-	0
2003	04	48	10	23	7	-	-	2
2004	04	54	4	28	2	-	-	0
2003	05	36	14	24	5	2	-	1
2004	05	52	4	29	2	-	-	1
2003	06	41	21	18	4	8	-	5
2004	06	46	16	23	4	3	-	0
2003	07	34	30	16	3	8	4	3
2004	07	50	17	21	7	3	-	0
2003	08	42	16	23	2	5	1	2
2004	08	42	19	20	5	6	-	0
2003	09	35	11	25	2	3	-	0
2004	09	39	17	20	6	4	-	0
2003	10	28	7	28	-	3	-	1
2004	10	41	6	29	1	1	-	0
2003	11	50	7	27	3	1	-	0
2004	11	45	10	24	5	1	-	2
2003	12	58	2	31	-	-	-	1
2004	12	62	1	31	-	-	-	0

Tabela 2.11: Resumo dos resultados *IRF* proveniente da PCD do Horto no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.

Ano	Mês	UR (%) (min/ 13h)	<i>IRF</i> (%) (média mensal 13h)	Número de dias com níveis de <i>IRF</i>				Dia com registro de evento de fogo
				baixo	médio	alto	Extremo	
2003	02	35,5	21	14	14	-	-	4
2004	02	52	22	17	12	-	-	0
2003	03	47	21	17	12	2	-	1
2004	03	60	27	12	19	-	-	1
2003	04	46	42	8	17	5	-	1
2004	04	51	32	3	26	1	-	0
2003	05	37	38	2	25	4	-	1
2004	05	61	30	5	26	-	-	0
2003	06	43	32	5	22	3	-	1
2004	06	43	38	-	23	5	-	1
2003	07	40	28	11	13	7	-	1
2004	07	49	33	7	16	8	-	0
2003	08	40	29	11	14	6	-	2
2004	08	52	35	4	27	-	-	1
2003	09	50	20	18	11	1	-	0
2004	09	45	35	2	26	2	-	3
2003	10	51	19	16	15	-	-	0
2004	10	50	29	7	24	-	-	0
2003	11	43	22	14	16	-	-	0
2004	11	43	25	10	20	-	-	0
2003	12	41	18	15	16	1	-	0
2004	12	57	28	6	25	-	-	0

2.5.2 - Índice de Monte Alegre (*FMA*) e Dados de Focos de Fogo

Na Tabela 2.12, analisando os resultados do *FMA* dos dados provenientes do Sumaré, detecta-se que de junho a agosto de 2003, 66% dos dias foram classificados como alto ou extremo grau de risco de incêndios (60% em junho, 71% em julho e 58% em agosto). Em 2004, verifica-se que de junho a agosto, 59% dos dias foi classificado como alto ou extremo grau de risco de incêndios (63% em junho, 22% em julho, 90% em agosto). Na Tabela 2.13, apresentam-se os resultados do *FMA* do setor do Horto, verificando que de junho a agosto de 2003, 45% dos dias foram classificados como alto ou extremo grau de perigo de incêndio (70% em junho, 58% em julho e 7% em agosto). Entretanto, somente no mês de junho, registrou-se índices na classe de extremo grau de risco. Ainda nesta Tabela, detecta-se que em 2004, de junho a agosto, 46% dos dias foi

classificado como alto ou extremo grau de risco de incêndios (53% em junho, 22% em julho e 61% em agosto).

Os resultados da *FMA*, no período de estudo, mostram que os valores máximos têm ocorrido em ambas as áreas em setembro em particular no Sumaré de 24 a 29 de setembro de 2004, quando a umidade relativa e temperatura do ar são 39% e 31°C, respectivamente. Nas Tabelas 2.12 e 2.13, a *FMA* apresenta as frequências dos níveis alto e extremo. Portanto, pode ser observado que as altas frequências de *FMA* do nível alto e extremo concentram-se durante a estação seca. O fato de este índice ser mais alto no mês de setembro foi devido aos baixos valores de precipitação nos meses de agosto e setembro, uma vez que o *FMA* é ajustado pela precipitação. Diferente do comportamento observado no índice *IRF*, o mês com índice alto foi o de julho de 2003.

Tabela 2.12: Resumo dos resultados *FMA* proveniente da PCD do Sumaré no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.

Ano	Mês	UR (%) Min/ 13h	FMA (%) (média mensal 13h)	Número de dias com níveis de <i>FMA</i>				Dia com registro de evento de fogo
				baixo	médio	alto	Extremo	
2003	02	35	56	0	1	7	11	8
2004	02	58	14	19	5	2	3	0
2003	03	39	17	15	10	4	2	5
2004	03	57	10	18	12	1	-	0
2003	04	48	26	9	7	9	5	2
2004	04	54	11	15	12	3	-	0
2003	05	36	26	10	6	11	4	1
2004	05	52	20	9	9	13	-	1
2003	06	41	42	3	6	9	12	5
2004	06	46	36	4	7	10	9	0
2003	07	34	32	5	4	20	2	3
2004	07	50	22	17	7	2	5	0
2003	08	42	32	7	6	10	8	2
2004	08	42	42	-	3	19	9	0
2003	09	35	15	13	7	10	-	0
2004	09	39	75	1	--	-	29	0
2003	10	28	10	16	14	1	-	1
2004	10	41	19	7	14	10	-	0
2003	11	50	6	23	7	-	-	0
2004	11	45	10	17	11	2	-	2
2003	12	58	11	17	11	3	-	1
2004	12	62	56	19	12	1	-	0

Tabela 2.13: Resumo dos resultados *FMA* proveniente da PCD do Horto no período de fevereiro a dezembro de 2003 e 2004.

Ano	Mês	UR (%) (min/13h)	FMA (%) (média mensal 13h)	Número de dias com níveis de <i>FMA</i>				Dia com registro de evento de fogo
				baixo	médio	alto	Extremo	
2003	02	36	52,8	1	4	7	16	4
2004	02	52	17,8	15	9	--	5	0
2003	03	47	24,4	9	10	10	2	1
2004	03	60	10,7	14	17	--	--	1
2003	04	46	25,8	9	8	13	--	1
2004	04	51	15,4	14	9	7	--	0
2003	05	37	33,9	7	7	8	9	1
2004	05	61	23,3	9	8	13	1	0
2003	06	43	46	3	6	10	11	1
2004	06	43	31,5	5	9	11	5	1
2003	07	40	26,4	5	8	18	--	1
2004	07	49	20,5	17	7	2	5	0
2003	08	40	12	15	14	2	--	2
2004	08	52	29,7	3	9	19	--	1
2003	09	50	14,4	14	9	7	--	0
2004	09	45	67	1	--	6	23	3
2003	10	51	10	16	15	--	--	0
2004	10	50	20,7	7	13	11	--	0
2003	11	43	10,5	17	13	--	--	0
2004	11	43	10	18	12	--	--	0
2003	12	41	15	13	10	8	--	0
2004	12	57	11,4	17	12	2	--	0

A partir dos índices *FMA* obtidos no Sumaré e no Horto observa-se que os resultados para os dois setores são semelhantes, como também pode ser verificado na Figura 2.7. Este comportamento pode se explicado devido às características da formulação do índice de risco da fórmula Monte Alegre (*FMA*), pois é um índice estritamente meteorológico, acumulativo e é corrigido pela precipitação. A Figura 2.7 apresenta a variação do *FMA* diário para Sumaré e Horto dos dados colecionados das PCD's durante o mês de setembro de 2004.

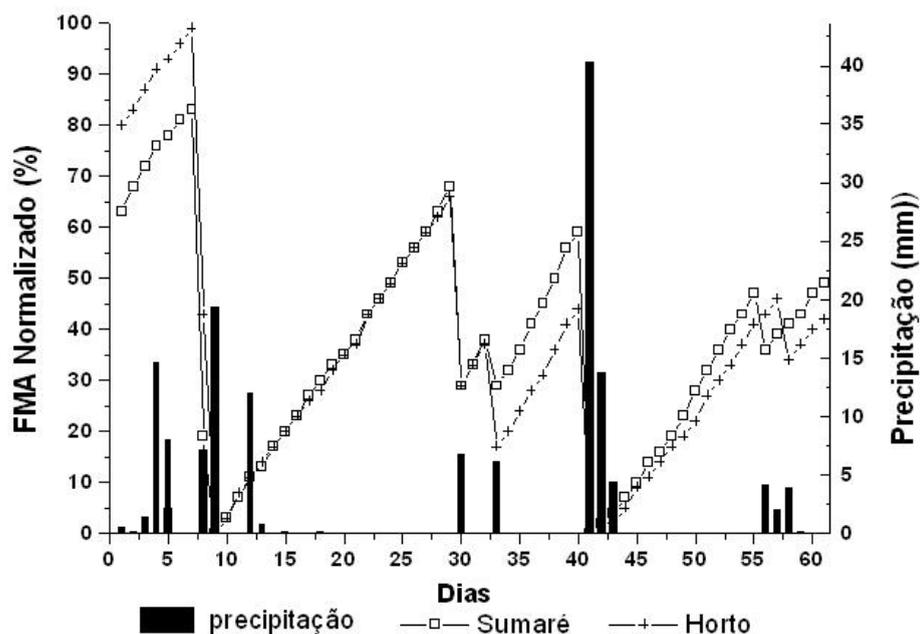


Figura 2.7: Variação diária do *FMA* e precipitação com dados coletados no setor do Sumaré e Horto no período de junho e julho de 2003.

Embora o período crítico do evento de fogo é normalmente durante a estação seca, ele foi registrado com número significativo de resultados de *IRF* e *FMA* variando de valores médios e extremos em ambas as áreas das PCD's em fevereiro de 2003. Conseqüentemente, a brigada de fogo registrou 12 casos de eventos de fogo distribuídos em 8 casos no Sumaré e 4 casos no Horto, apresentados nas Tabelas 2.10 e 2.11. A precipitação total registrada no Sumaré foi de 4,2 mm e 111,0 mm em fevereiro de 2003 e 2004, respectivamente. Comportamento semelhante também foi observado no resultado obtido utilizando o índice *FMA* (Tabela 2.12-2.13).

2.5.3 - Índice de Resistência do Fogo (*IRF*) e Variáveis Meteorológicas

Na Figura 2.8, é representado o comportamento dos valores de *IRF*, *T* e *UR* para Sumaré durante 220 horas em julho 2003. Observa-se que a curva de *IRF* tem valores maiores, enquanto os valores *T* aumentam simultaneamente com decréscimo de *UR*. Por exemplo, pode ser observado aproximadamente durante os intervalos de horas entre 64-92 horas e 99-115 horas na Figura 2.8.

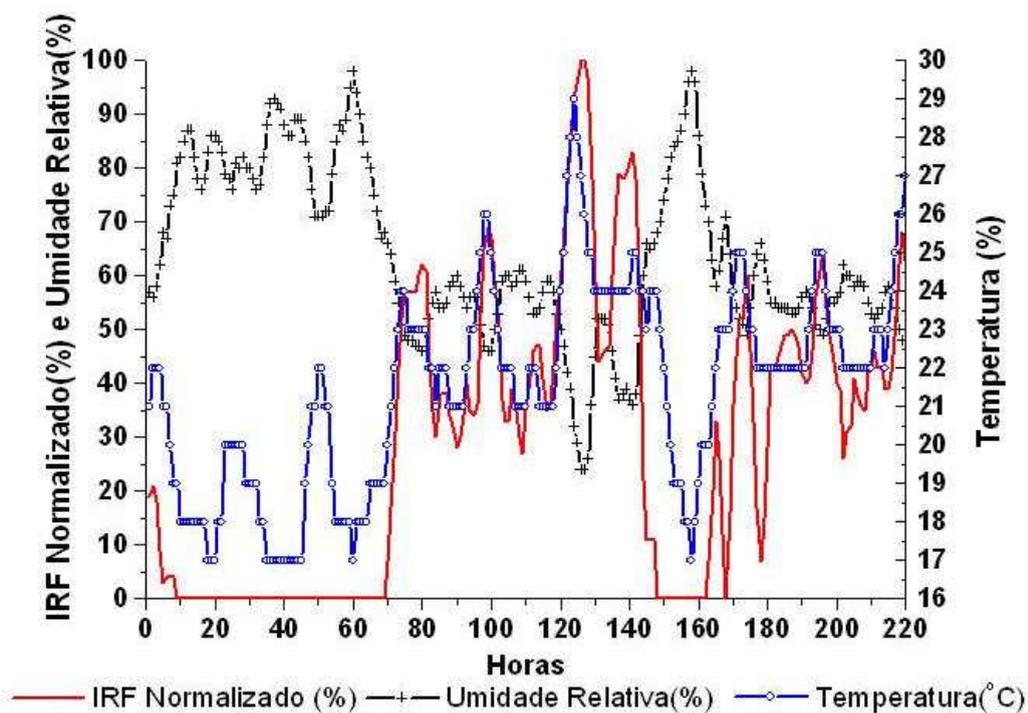


Figura 2.8: Variação horária do *IRF*, temperatura e umidade relativa com dados coletados no setor do Sumaré no período de 220 horas em julho de 2003.

2.5.4 - Índice de Resistência do Fogo (*IRF*) e Umidade do Material Combustível

As variáveis de temperatura e umidade do material combustível também podem ser utilizadas no cálculo dos índices do sistema NFDRS, dado que o estado da vegetação aferido por estes indicadores é um elemento importante para quantificar as alterações na inflamabilidade do combustível e a sua resposta às alterações das condições atmosféricas.

Nas Figuras 2.9 e 2.10, observa-se a correlação entre a umidade do material combustível e a umidade relativa que é aproximadamente 0,7 e 0,8 para o Horto e o Sumaré, respectivamente. Ainda nestas Figuras, pode-se observar o comportamento dos índices de resistência do fogo (*IRF*) nos setores Horto e Sumaré.

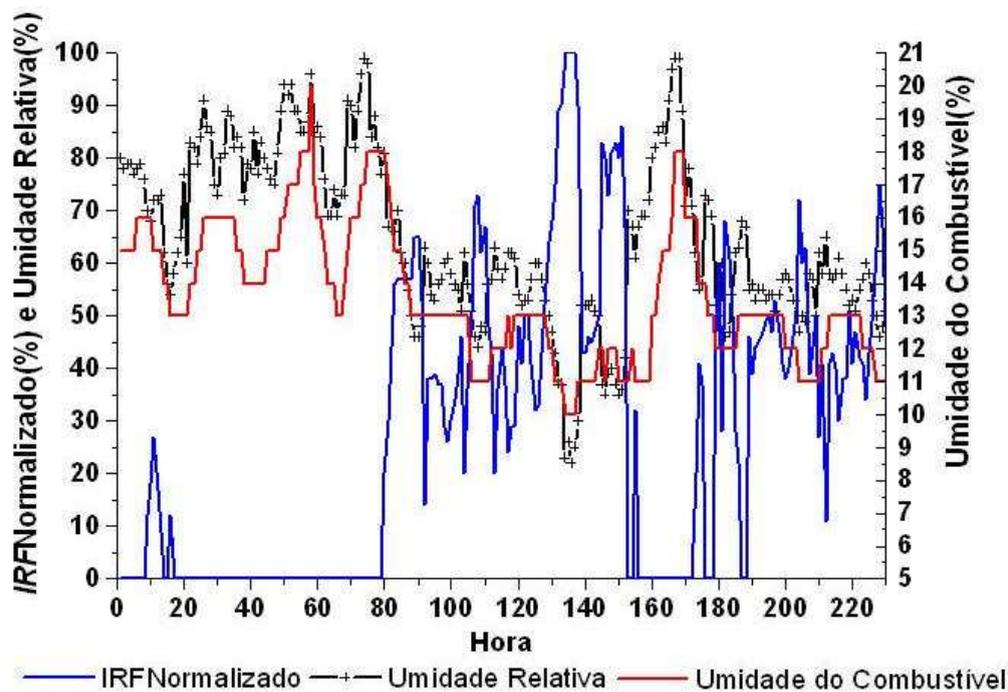


Figura 2.9: Variação horária do índice *IRF* e umidade relativa do ar e a umidade do combustível com dados coletados no setor do Sumaré no período de 220 horas em julho de 2003.

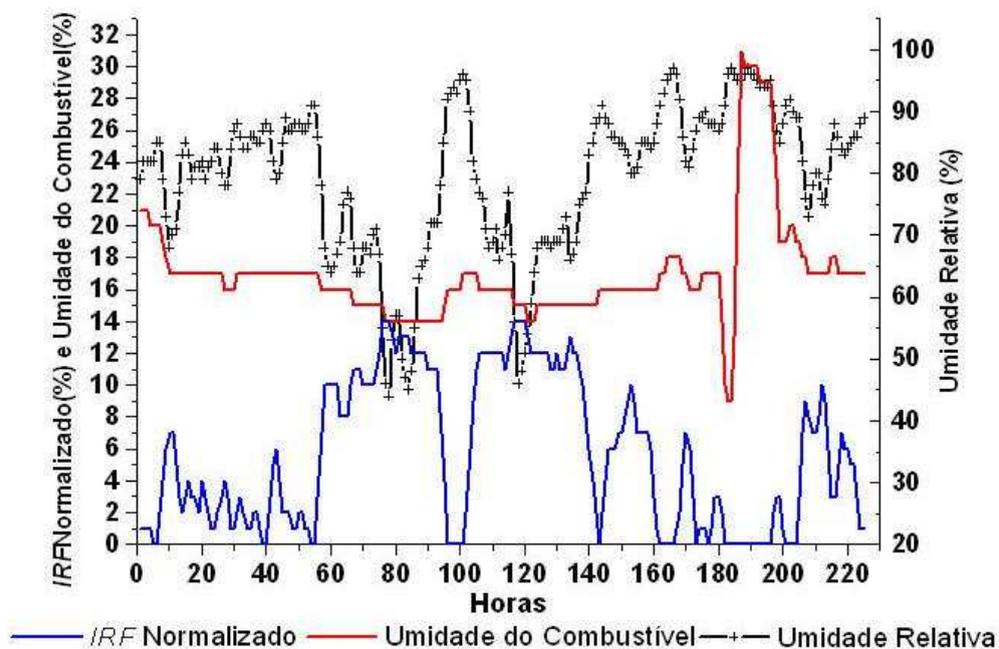


Figura 2.10: Variação horária do índice *IRF* e umidade relativa do ar e a umidade do combustível com dados coletados no setor do Horto no período de 220 horas em julho de 2003.

Pelas análises de correlação entre a umidade do combustível e a umidade relativa do ar, observa-se que na vegetação de gramíneas (Figura 2.9) a curva de umidade do combustível decresce à medida que a umidade do ar decresce, a resposta da vegetação é imediata. Na vegetação de floresta (Figura 2.10), verifica-se que a umidade do combustível acompanha a variação da umidade do ar, mas a resposta é mais lenta.

Este comportamento da perda de umidade da vegetação ocorre em consequência do processo de transpiração, que é a evaporação devido à ação fisiológica dos vegetais. As plantas, através de suas raízes, retiram do solo a água para suas atividades vitais. Parte dessa água é cedida à atmosfera, sob a forma de vapor, na superfície das folhas. Deste modo, a atmosfera atua como um dreno para vapor d' água, quanto mais seco estiver o ar (baixa umidade relativa), maior será a força desse dreno e assim maior será a perda de água pela planta. Em vegetação de pequeno porte, como gramíneas, a perda de umidade ocorre poucas horas depois da chuva e dependendo do período sem chuvas ou com chuvas inferiores a 20 mm a recuperação da sua umidade é mais lenta, quando comparada com a vegetação de floresta (VOLPATO, 2002).

2.5.5 – Variáveis Meteorológicas e Índices de Risco de Incêndio

Nas Figuras 2.11 e 2.13 observa-se que o grau de risco de incêndio, calculados diariamente pelos índices de Resistência ao Fogo (*IRF*), índice Meteorológico de Incêndio (*FWI*), fórmula de Monte Alegre (*FMA*), Nesterov (*IN*) e Angstron (*Ang*), indica graus semelhantes para a mesma data nos dois setores Horto e Sumaré. Na Figura 2.11, é mostrado o comportamento dos índices *IRF*, *FWI*, *IN* e *Ang* no mês de julho e agosto de 2003. Observa-se que os índices *FMA* e *IN* possuem uma alta correlação conforme apresentado nas Tabelas 2.14 e 2.15 para o Horto e o Sumaré, respectivamente. Este resultado deve-se por ser índices acumulativos, além de ambos serem corrigidos pela precipitação.

No entanto, os resultados apresentados nas Figuras 2.11 e 2.12 para o índice de risco de Angstron, que é não acumulativo, é mais sensível a oscilação da umidade do ar e a precipitação daí a diferença do seu comportamento em relação aos demais índices. Este comportamento pode ser observado aproximadamente entre os períodos 12-13 e

57-59 nas Figuras 2.11 e 2.12, no setor do Sumaré, quando houve uma resposta imediata do índice a um decréscimo na umidade do ar. Esta resposta do índice de Angstron também é registrada no setor do Horto (Figuras 2.13 e 2.14). Embora exista correlação positiva do índice de Angstron com os demais índices, observa-se que a maior correlação ocorre no setor do Sumaré, em função da degradação já mencionada, que provoca uma perda mais rápida da umidade do combustível e aumento da temperatura.

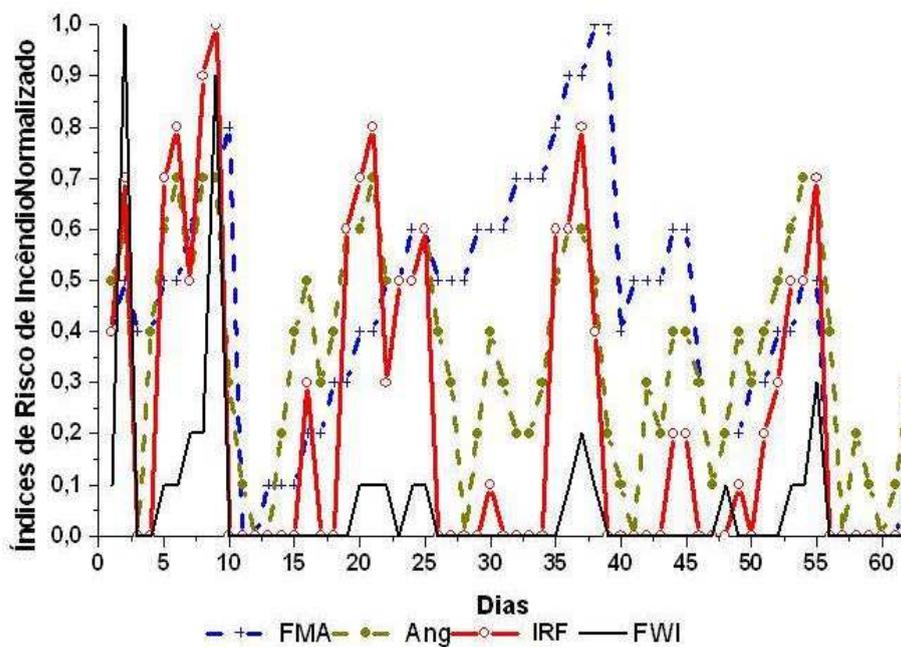


Figura 2.11: Comparação da variação diária dos índices *FMA*, *Ang*, *IRF* e *FWI* dos dados coletados no setor do Sumaré no mês de julho e agosto de 2003.

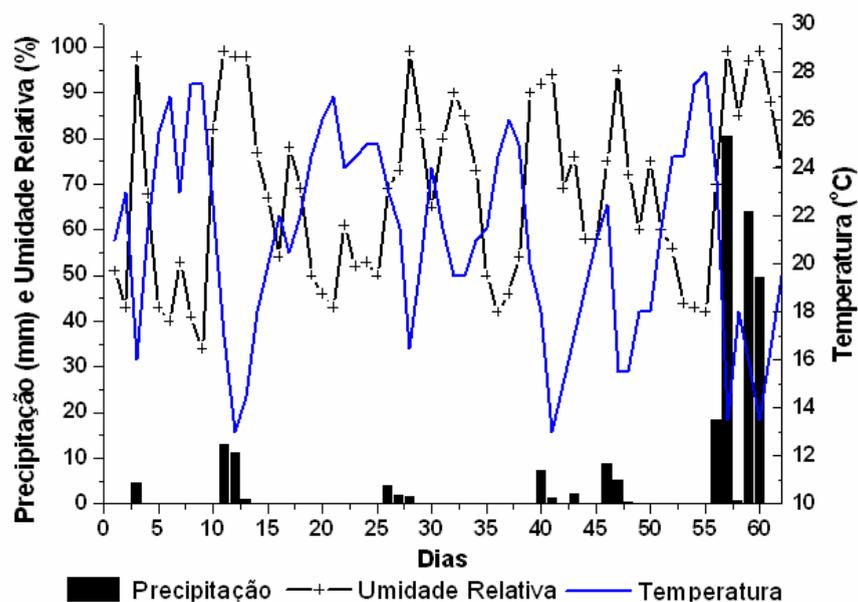


Figura 2.12: Variação diária da temperatura, umidade relativa e precipitação dos dados coletados no setor do Sumaré no mês de julho e agosto de 2003.

Ainda, observa-se (Figuras 2.11 e 2.12) que a resposta dos índices acumulativos a variação da umidade e temperatura é mais lenta, principalmente quando houve precipitação, conforme esperado. Este comportamento também é observado na Tabela 2.16, onde os coeficientes de correlação são menores que 0,85.

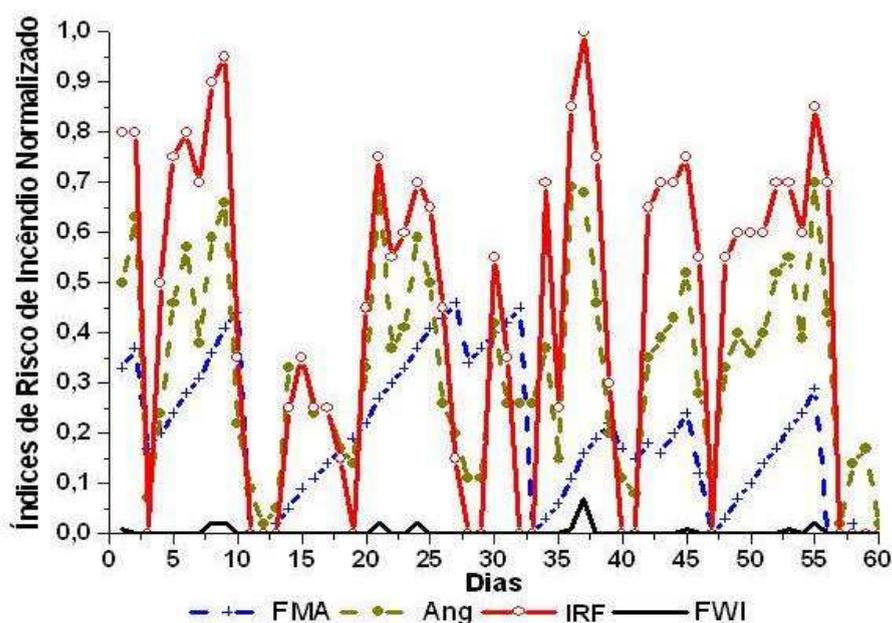


Figura 2.13: Comparação da variação diária dos índices *FMA*, *Ang*, *IRF* e *FWI* dos dados coletados no setor do Horto no mês de julho e agosto de 2003.

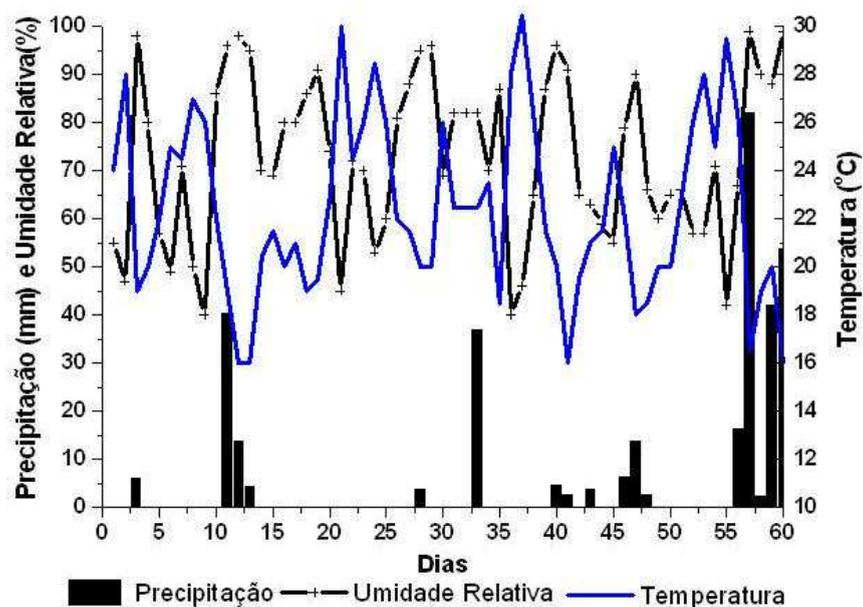


Figura 2.14: Variação diária da temperatura, umidade relativa e precipitação dos dados coletados no setor do Horto no mês de julho e agosto de 2003.

Tabela 2.14: Valores do coeficiente de correlação (r) entre os índices: fórmula de Monte Alegre (FMA), Nesterov (IN), Angstrom (Ang), índice de resistência ao fogo (IRF) e índice meteorológico de incêndio (FWI), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Sumaré.

Variáveis	FMA	IN	Ang	IRF	FWI
FMA	1	0,94	0,38	0,38	0,13
IN		1	0,41	0,38	0,17
Ang				0,75	0,31
IRF				1	0,34
FWI					1

(n=691, *= correlações significativas a 5%)

Tabela 2.15: Valores do coeficiente de correlação (r) entre os índices: fórmula de Monte Alegre (FMA), Nesterov (IN), Angstrom (Ang), índice de resistência ao fogo (IRF) e índice meteorológico de incêndio (FWI), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Horto.

Variáveis	FMA	IN	Ang	IRF	FWI
FMA	1	0,88	0,31	0,38	0,24
IN		1	0,38	0,50	0,15
Ang			1	0,60	0,16
IRF				1	0,24
FWI					1

(n=691, *= correlações significativas a 5%)

Os resultados da correlação entre os índices de risco de incêndios apresentados nas Tabelas 2.16 e 2.17 para os setores Horto e Sumaré, respectivamente, observa-se que todos os índices comportam-se como o esperado, correlacionados positivamente com a temperatura do ar e negativamente com a umidade relativa do ar e precipitação. Os índices acumulativos apresentaram valores de correlação similares para o comportamento de todas as variáveis meteorológicas. Em geral os valores da correlação para os índices foram ligeiramente superiores no setor do Sumaré do que Horto.

Tabela 2.16: Valores do coeficiente de correlação (r) entre variáveis meteorológicas (temperatura do ar, T em °C, umidade relativa, UR em %, velocidade do vento a 10 m, VV em m/s e precipitação, P em mm) e os índices: fórmula de Monte Alegre (FMA), Nesterov (IN), Angstrom (Ang), índice de resistência ao fogo (IRF) e índice meteorológico de incêndio (FWI), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Sumaré.

Variáveis	T	UR	P
FMA	0,28	-0,39	-0,32
IN	0,38	-0,39	-0,27
Ang	0,85	-0,96	-0,35
IRF	0,55	-0,80	-0,17
FWI	0,27	-0,29	-0,04

(n=691, *= correlações significativas a 5%)

Tabela 2.17: Valores do coeficiente de correlação (r) entre variáveis meteorológicas (temperatura do ar, T em °C, umidade relativa, UR em %, velocidade do vento a 10 m, VV em m/s e precipitação, P em mm) e os índices: fórmula de Monte Alegre (*FMA*), Nesterov (*IN*), Angstrom (*Ang*), índice de resistência ao fogo (*IRF*) e índice meteorológico de incêndio (*FWI*), nos meses de fevereiro de 2003 a dezembro de 2004 no Horto.

Variáveis	T	UR	P
FMA	0,27	-0,30	-0,35
IN	0,40	-0,32	-0,28
Ang	0,85	-0,95	-0,39
IRF	0,50	-0,63	-0,37
FWI	0,11	-0,17	-0,07

(n=691, *= correlações significativas a 5%)

O índice meteorológico de incêndio (*FWI*) apresentou um número de dias com classificação média de grau de risco de incêndio, apresentando uma baixa correlação com relação aos índices e as variáveis meteorológicas (Tabela 2.14-2.17), quando comparado com outros índices.

Capítulo 3

Modelagem Computacional do Avanço da Frente do Fogo

3.1 – Introdução

O comportamento do fenômeno de incêndio em florestas é determinado pela interação de três sistemas dinâmicos: o combustível, a chama e o ambiente. Estes sistemas interagem entre si por meio de processos químicos e físicos, como a combustão e a transferência de calor. Este comportamento é irregular e de difícil previsão, pois este tipo de combustão possui mecanismos de retroalimentação, cuja interação com o seu ambiente cria um fenômeno muito instável. A complexidade deste fenômeno e a falta de informações levaram a necessidade de estudos e de desenvolvimento de ferramentas de simulação baseado em modelos matemáticos e físicos com objetivo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender o comportamento do fogo e ou avaliar estratégias para sua operação.

Os modelos de comportamento de fogo são geralmente compostos por equações e as suas soluções numéricas descrevem a evolução temporal e espacial de um ou mais parâmetros tais como: taxa de propagação, altura da chama e risco de ignição ou consumo de combustível. Para isto, foram desenvolvidos modelos utilizando diferentes métodos para predizer o processo de propagação de incêndio florestal e sua geometria.

CATCHPOLE (1986) e WEBER (1991) definem três tipos de modelos de propagação de incêndio florestal: modelos físicos; modelos semi-empíricos e modelos estatísticos.

Os modelos físicos predizem a propagação do fogo baseados no mecanismo de transferência de calor do material em combustão para o leito combustível. Os processos físicos responsáveis pela transferência de calor são: condução, convecção e radiação (térmica). Para exemplificar, pode-se citar o trabalho de ALBINI (1985) que descreve a propagação do fogo por meio do balanço do aquecimento radiativo bidimensional com a reação de liberação da umidade pelos combustíveis.

Os modelos semi-empíricos combinam a teoria física com a correlação estatística para gerar fórmulas que descrevem o comportamento do fogo. Pode-se citar como exemplos utilizando este tipo: o modelo de ROTHERMEL (1972) que aplicou o princípio da conservação de energia associado aos dados experimentais de incêndio. Ele representa a taxa de propagação do fogo como uma função da densidade do combustível, tamanho da partícula, densidade de massa e taxa de consumo do combustível; e o *The Canadian Forest Fire Behavior Prediction System (FBP)* (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) relaciona as características do combustível com as características do comportamento do fogo, combinando as informações de pesquisas da teoria da transferência de calor com as observações de 495 incêndios experimentais. O sistema *FBP* é usado para descrever o comportamento do incêndio em 16 tipos específicos de combustível descritos em 5 grupos principais de combustível.

Os modelos estatísticos de predição de incêndios ajustam um conjunto de equações para dados derivados a partir de incêndios-testes. As equações predizem os parâmetros do fogo tais como a taxa de propagação, o consumo de combustível e a intensidade da linha de fogo. Como o modelo estatístico não é baseado em processos físicos, sua aplicação é limitada para condições semelhantes a esses incêndios-testes. Um exemplo é o modelo de McARTHUR (McARTHUR, 1966, NOBLE *et al.*, 1980) que descreve o avanço do fogo em gramíneas e em florestas. Ele é baseado em mais de 800 incêndios, mas não considera a relação física entre os parâmetros.

Os modelos também podem ser classificados de acordo com a modelagem do sistema físico como: modelo de incêndio de superfície que corresponde à paisagem com combustível com superfície menor que 2 metros. Pequenas árvores, vegetação de cerrado e herbáceo; modelo de incêndio de copa representa os estratos superiores da vegetação que se encontram acima de 1m a 2m a partir do solo; modelo de incêndio de

Spotting que consiste nas fagulhas transportadas por colunas de convecção ou pelo vento para fora do perímetro principal do fogo e modelo de incêndio de solo que representa a camada orgânica presente na área de floresta, também denominada por serrapilheira ou *litter*.

3.2 – Revisão Bibliográfica

Os primeiros modelos de comportamento do fogo exigiam que se estimassem as variáveis de entrada e as condições ambientais manualmente ou pela calculadora a partir de mapas topográficos e/ou chaves (por exemplo, cálculos de declividade, aspecto e velocidade do vento de meia-chama) (GRUPE, 1998). Estes modelos usavam nomogramas de papel que só forneciam saídas numéricas e tinham pouca capacidade de prever a distribuição espacial do incêndio em uma paisagem (SAMPAIO, 1999).

Para modelar a propagação de incêndio em florestas é necessário incorporar um grande número de parâmetros, obtidos através de experimentos e observações de campo. Os primeiros trabalhos experimentais ao ar livre referentes à propagação de incêndio foram conduzidos pelo USDA⁷ *Forest Service*, em 1959, visando o entendimento de relações entre as condições de queima e as variáveis que determinam a ocorrência de fogo em florestas. Parâmetros como umidade e peso de combustível, velocidade do vento, umidade relativa, topografia e aspectos solares foram reconhecidos como importantes na ocorrência de fogo. A correlação desses parâmetros forneceu os fundamentos para explicar o comportamento de incêndios em florestas.

Considerando a complexidade do problema e as características de parâmetros meteorológicos, em particular do vento, muitas das avaliações presentes (risco de incêndio, classificação de combustível, entre outros usos da pesquisas) estão baseadas nos trabalhos pioneiros do USDA *Forest Service* (ROTHERMEL, 1972).

A primeira tentativa teórica para descrever a propagação do fogo, usando um modelo matemático, foi de FONS (1946), que estudou o transporte de calor gerado pelo incêndio, através de uma fina camada de combustível. FONS (1946) verificou a

⁷ USDA: *United State Department of Agriculture*.

importância de uma determinada quantidade de calor para conduzir o combustível adjacente a uma temperatura de ignição à frente da chama. Assim, formulou que a propagação de fogo, em um leito combustível, pode ser visualizada como uma série de sucessivas ignições, em que a taxa é controlada, em primeiro lugar, pelo tempo de ignição e a distância entre as partículas de combustível.

As idéias de FONS foram confirmadas através dos trabalhos de TARIFA *et al.* (1967), que apontaram a importância para a modelagem dos mecanismos de transporte de calor da frente de fogo. As análises de McALEVY *et al.* (1967) mostraram que o fenômeno físico de propagação de incêndio sobre uma superfície é um processo contínuo e difusivo, estando ligado ao fenômeno de combustão.

McARTHUR (1969) desenvolveu um cartão de medidas para determinar os parâmetros de incêndio em um determinado tipo de combustível. A partir destas medidas, NOBLE *et al.* (1980) ajustou as equações. Esta ferramenta é usada para prever a ocorrência de incêndios na Austrália.

A literatura sobre modelagem matemática para o cálculo das taxas de avanço da propagação de incêndio é bastante vasta, passando por diversas revisões. Estas revisões utilizam os mesmos princípios físicos diferenciando-se pela aplicação teórica destes e no tratamento das características do combustível, utilização de diferentes tipos de arranjos de combustível⁸ com propriedades físicas e químicas distintas, a fim de se especificar o comportamento do fogo⁹. Segundo ALBINI (1976) destacam-se os trabalhos de: FONS (1946) e THOMAS (1967), HOTTEL *et al.* (1965), ALBINI (1967), ANDERSON (1969), FANG *et al.* (1969), STEWARD (1974), FRANDSEN (1971), ROTHERMEL (1972), PAGNI *et al.* (1973).

O modelo de ROTHERMEL (1972) é o trabalho experimental mais aceito, sendo o mais citado na literatura. Ele serviu de base para o desenvolvimento do programa BEHAVE – Sistema de Modelagem do Combustível e da Predição do Comportamento do Fogo (BURGAN *et al.*, 1984), que também usou as aproximações das medidas de McARTHUR e fez parte do sistema FARSITE (FINNEY, 1998). A

⁸ floresta, vegetação rasteira, leito descrito matematicamente, leito poroso uniforme.

⁹ Taxa de avanço de propagação, intensidade, comprimento da chama e tempo de queima.

primeira versão do sistema BEHAVE foi desenvolvida pelo Departamento de Serviço Florestal e de Agricultura dos Estados Unidos e é o programa mais adotado e difundido para prever a taxa de propagação de incêndio, auxiliando no seu controle e manejo.

Outros modelos foram desenvolvidos para descrever os incêndios de copa. Para esta modelagem duas questões foram consideradas: análise das condições de transição do incêndio de superfície para copa das árvores e o estudo das variáveis que determinam este tipo de evolução tais como: conteúdo de umidade foliar, continuidade vertical e velocidade do vento. Os estudos de maior relevância com esta abordagem são Van WAGNER (1977), ROTHERMEL (1991), BYRAM (1959), ALBINI (1979) e FINNEY (1998).

Para ocorrência de *spotting*, que é um fenômeno associado a grandes incêndios, os primeiros trabalhos teóricos foram realizados por TARIFA *et al.* (1967) e ALBINI (1979) que desenvolveram um modelo de equações para prever o comportamento de incêndio de *spotting*, através da determinação do perfil do vento sobre uma cobertura de vegetação.

Os resultados experimentais obtidos em túnel de vento mostraram que a taxa de propagação é dependente das propriedades do combustível, tais como: mistura do conteúdo do leito combustível e de sua espessura. Propriedades como temperatura da chama, fluxo de radiação, profundidade da chama e tempo de inflamabilidade também foram estudados e verificou-se que a eficiência da queima diminui com o decréscimo da velocidade do vento.

ANDERSON (1969), utilizando as informações obtidas por FONS (1946), apresentou um modelo bastante simples para descrever o avanço do fogo sobre o leito combustível. Este modelo permite uma estimativa aproximada da forma, tamanho e taxa de crescimento do perímetro de um incêndio na presença de vento, usando somente a taxa de avanço da propagação. VAN WAGNER (1969) propôs um método bastante similar ao anterior, usando taxas de avanço da frente do incêndio para adiante, para os lados e no recuo.

A partir da década de 70, os modelos computacionais de crescimento de incêndio integraram técnicas de simulação numérica. Estas técnicas possibilitaram trabalhar com Sistema Integrado de Informações e imagens digitais, onde as informações da frente de fogo são geradas possibilitando simular o comportamento do fogo. Estes simuladores são classificados segundo os aspectos pertinentes aos modelos matemáticos aplicados na predição do incêndio que descrevem a propagação do fogo através da paisagem. Os modelos diferem com relação à forma de representar a paisagem e o processo de propagação. Eles são a Bond Percolação, Autômato Celular e Propagação por Onda Elíptica.

A técnica de simulação do fogo por Bond Percolação (STAUFFER, 1985) representa a paisagem como uma malha quadrática, triangular ou hexagonal. O fogo avança de uma célula para uma célula vizinha por meio do contato do combustível em ignição. O usuário pode ajustar a direção e a probabilidade de avanço do fogo utilizando as variáveis de velocidade do vento, topografia e tipos de combustível (MACKAY *et al.*, 1984, OHTSUKI *et al.*, 1986). Esta técnica é limitada para condições similares, pois não é baseada em processos físicos. EMBY (HARGROVE *et al.*, 1993, ALBRIGHT *et al.*, 1999) não determina a predição diária e horária do comportamento de um incêndio em particular.

O modelo matemático de autômato celular, desenvolvido por KOURTZ *et al.* (1971), consiste num grupo de pontos que são representados por uma grade bidimensional. Cada conjunto de pontos desta grade é chamado de célula. A dinâmica do modelo é definida por meio de um conjunto de regras de transição que estabelece qual será o estado de uma célula no momento seguinte a partir do seu estado atual e do estado das células vizinhas. As regras de transição podem ser determinísticas ou probabilísticas. Esse modelo busca determinar a dispersão da combustão entre cada célula vizinha.

Dentre os sistemas que utilizam o modelo matemático de autômato celular para simulação do crescimento do incêndio pode-se citar DYNAFIRE (KALABOKIDIS *et al.*, 1991), FIREMAP (BALL *et al.*, 1992, CLARK *et al.*, 1994). Os dois primeiros sistemas empregam o modelo de predição de incêndios do BEHAVE (ROTHERMEL,

1972, ANDREWS, 1986) e o FIREMAP (BALL *et al.*, 1991) utiliza um modelo probabilístico para determinar a predição do comportamento do fogo.

A vantagem destas duas técnicas é a simplicidade da implementação do comportamento do fogo, que pode ser bastante complexo (WOLFRAM, 1984). Elas podem ser utilizadas quando as propriedades físicas não são conhecidas.

A técnica por propagação por onda elíptica projeta a paisagem como meio contínuo ao invés de uma grade quadrática ou de células. O fogo se propaga por sobre um tempo finito usando pontos que definem a frente de fogo como fontes independentes de pequenas ondas elípticas. Estas pequenas elipses podem ser pensadas como formando um envelope ao redor do perímetro original, onde a margem exterior representa a nova frente do fogo. Este processo foi descrito como princípio de Huygens (ANDERSON *et al.*, 1982), dedicado ao matemático holandês Christian Huygens no século XVII, que delineou a expansão de ondas de luz.

A reconstituição da forma da propagação de incêndio, a partir da utilização da matemática de uma elipse e do conceito do Princípio de Huygens, tem sido objeto de atenção de diversos autores. ANDERSON *et al.* (1982) introduziu esta terminologia na literatura sobre modelos de incêndio. A combinação deste princípio com a aproximação elíptica, utilizando dados de perímetro obtidos em testes de incêndio realizados em campo, permitiu o desenvolvimento de um modelo conveniente de crescimento de incêndio.

RICHARDS (1990), usando a equação da elipse para modelar a propagação de incêndio, derivou analiticamente uma equação diferencial que propaga um ponto qualquer, descrevendo, assim, a forma de incêndio. Este modelo desenvolvido com grau crescente de complexidade assumiu, no início, homogeneidade nas condições ambientais de topografia e de combustível. Posteriormente, o modelo assumiu condições heterogêneas, estendendo suas equações para expansão de outras formas de incêndio diferentes de uma simples elipse.

Uma abordagem similar foi sugerida por BEER (1990), FRENCH (1992), KNIGHT *et al.* (1993) e WALLACE (1993) para implementar computacionalmente a posição do perímetro de incêndio.

Dois sistemas utilizam o modelo de propagação de onda elíptica, o WILDFIRE e o FARSITE – Simulador da Área do Incêndio. WILDFIRE (WALLACE, 1993) oferece um sistema para simular o comportamento do incêndio sob várias condições físicas. Sua técnica de propagação de onda elíptica requer a especificação da taxa de propagação da frente do incêndio e os parâmetros do formato elíptico, tais como os caracterizados pelo sistema canadense de predição do comportamento do fogo *FBP* (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) para prever a posição da linha de fogo com o passar do tempo. As condições climáticas são assumidas como espacialmente uniformes, mas a velocidade do vento pode ser mudada com o passar do tempo. Os produtos consistem em mapas dos perímetros do incêndio a passos definidos pelo usuário e uma intensidade final da linha do fogo (FERNANDES, 2003).

As abordagens mais recentes, que tratam do problema de incêndios em floresta utilizando modelos matemáticos e numéricos, descrevem a interação da frente de incêndio na floresta com o vento dentro da camada superficial da atmosfera. Destes trabalhos pode-se citar os estudos realizados por GRISHIM (1984), GRISHIM (1993) e CLARK *et al.*, (1996).

A partir dessas ferramentas integradas de predição de incêndio são desenvolvidas, utilizando diferentes aspectos da implementação de modelos, técnicas de simulação e objetivo do uso. Dentre esses sistemas pode-se citar “DYNAFIRE” (KALABOKIDIS *et al.*, 1991), FIREMAP (BALL *et al.*, 1991) conjuga o sistema BEHAVE com a aproximação baseado em células para a simulação. Ao contrário de outros sistemas de simulação, EMBY (HARGROVE *et al.*, 1993) é um modelo probabilístico que tenta prever um modelo de queima potencial de grandes incêndios; FIRESTATION, assim como outros são baseados no modelo BEHAVE e utiliza aproximação por célula *grid*, além disso, incorpora a ferramenta para simulação do campo de vento; BehavePLUS (ANDREWS *et al.*, 1998) é uma versão do BEHAVE e uma das suas principais limitações é não trabalhar com dados espaciais; NEXUS utiliza o modelo de ROTHERMEL e é similar ao BehavePLUS; FARSITE (FINNEY, 1998)

também utilizar o modelo de ROTHERMEL entre outros para determinar incêndio de superfície, copa e *spotting*. A técnica de simulação aplicada é de propagação de onda e a sua principal vantagem é a geração de grids que podem ser visualizados em um sistema de informação geográfica: FIRE (WEINSTEIN, 1995) é um programa semelhante ao FARSITE, mas as suas principais desvantagens em relação ao FARSITE são a performance, que não é em tempo real, utilizando as condições atmosféricas constantes e não representa bem os modelos de *spotting*.

Deste modo, a simulação do comportamento do avanço da frente do incêndio florestal torna-se um componente importante em um sistema de prevenção e mitigação do risco de incêndios. Para tal, são importantes compreender a estrutura e funcionamento dos ecossistemas e a interação de outros agentes ambientais e antrópicos para com estes.

A grande maioria dos sistemas integrados de predição do comportamento do fogo, atualmente utilizados, baseia-se em modelos dos tipos estatísticos e semi-empíricos. Entretanto, um dos problemas encontrados na sua aplicação é a validação dos resultados obtidos. Isto devido à complexidade dos processos físicos e químicos dos incêndios florestais e a necessidade de dados que incluem a velocidade do vento e sua direção e outras condições atmosféricas, propriedades do combustível, topografia e dados reais de eventos de foco de fogo.

Neste trabalho, adota-se o FARSITE devido à capacidade de simular o avanço da frente do incêndio e seu comportamento em diferentes tipos de combustíveis e terrenos, além da sua integração com sistema de informação geográfica. Países como Estados Unidos, México e Canadá utilizam este programa no seu sistema de monitoramento, apresentando bons resultados. O objetivo é avaliar a sua aplicabilidade em uma área florestal. Neste caso, a área de estudo é o Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca).

3.3 - FARSITE: Simulador Computacional do Avanço da Frente de Fogo

O sistema FARSITE (*Fire Area Simulator*) (FINNEY, 1998) é um software de simulação de incêndios florestais que utiliza um modelo bidimensional que descreve o avanço da frente do fogo. Este sistema foi desenvolvido a partir da combinação de modelos de incêndio de superfície, de copa, *spotting*, aceleração do fogo no ponto fonte e umidade do material combustível. O sistema é baseado em um modelo de solução determinística que fornece a taxa de propagação, a intensidade dos incêndios, predizendo onde e como será o mesmo. A forma bidimensional na horizontal é assumida para gerar o formato elipsoidal. Para integrar as informações dos modelos o FARSITE utiliza o Sistema de Informação Geográfica (SIG).

A aproximação utilizada para integrar os modelos que compõem o FARSITE é o Princípio de Huygens. O método de RICHARDS foi o escolhido para implementar o Princípio de Huygens, que assume que cada vértice da série elíptica, que define a margem do incêndio, pode servir como fonte de uma expansão elíptica independente. Nesse tipo de aproximação, as informações físicas são transmitidas em todas as direções. O crescimento do incêndio também ocorre no sentido contrário ao da velocidade, conferindo características elípticas ao comportamento do incêndio. Desta forma, as informações necessárias para cada vértice são:

- Orientação do vértice na frente do fogo em termos de componentes diferenciais x_s, y_s ;
- Direção da máxima taxa de propagação do fogo θ (resultado da topografia e da velocidade do vento);
- As dimensões a, b e c que vão fornecer a forma da elipse do incêndio.

Nesta seção, são apresentados o modelo numérico de RICHARD (1990) e uma descrição do sistema FARSITE.

3.3.1 - Modelo de RICHARDS

O modelo de RICHARDS (1990), baseado nas idéias de ANDERSON *et al.* (1981), procura descrever o crescimento da frente de incêndio, determinando a sua forma e a posição. A forma da frente do incêndio é afetada principalmente pelos seguintes fatores: tipo de combustível e conteúdo de umidade, velocidade e direção do vento, topografia e a existência de barreiras naturais, continuidade do combustível e a ocorrência de *spotting*. Este modelo utiliza um sistema de equações diferenciais para uma aproximação analítica de uma elipse, junto com o Princípio de Huygen.

O Princípio de Huygen define que cada ponto na frente de incêndio, no tempo t , é um ponto de ignição, que dará origem a um foco de incêndio em um intervalo de tempo dt e queimarão em uma região elíptica. Cada elipse é definida por meio das condições geradas neste ponto e no tempo dt . Essas condições estão relacionadas com o tipo de combustível e conteúdo de umidade, velocidade e direção do vento, topografia, existência de barreiras naturais e continuidade do combustível. O perímetro da nova frente de incêndio é definido como o conjunto de todas as elipses (Figura 3.1). Cada ponto na frente do incêndio contém informações de tempo, direção e taxa de propagação do fogo. Estas informações são obtidas por meio da combinação de alguns modelos que determinam diferentes comportamentos de fogo em vegetação. Estes tipos de modelos de propagação de incêndio são: superfície (ROTHERMEL 1972, ANDREWS 1986), copa (VAN WAGNER 1977 a 1993, ROTHERMEL 1991) e *spotting* (ALBINI, 1983).

A Figura 3.1 mostra duas aplicações do Princípio de Huygens, usando uma série elíptica: (A) refere-se à forma de incêndio sobre condições uniformes e (B) apresenta as formas e tamanhos das elipses sobre condições não uniformes de combustível, topografia, orientação e velocidade do vento.

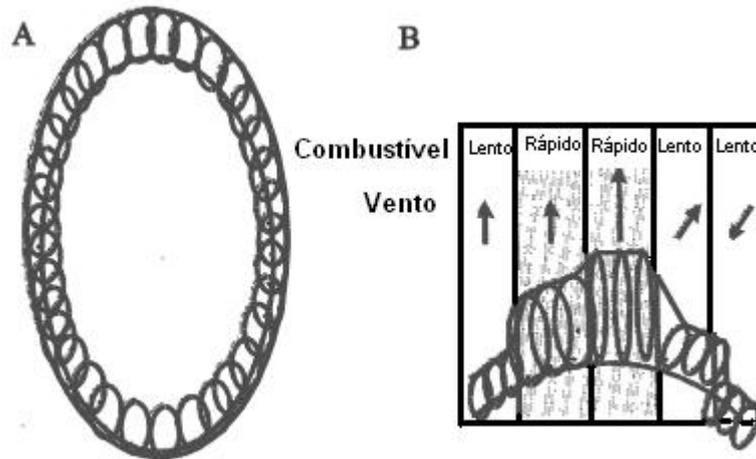


Figura 3.1: Princípio de Huygens usando uma série elíptica.

Fonte: FINNEY, 1998.

A equação (3.1) descreve a expansão da ignição de fogo em um ponto na forma de uma elipse, supondo-se que as condições de vento e topografia são constantes e sem irregularidades na camada horizontal do combustível.

$$x(s,t) = a t \cos \theta \tag{3.1}$$

$$y(s,t) = b t \sin \theta$$

sendo θ ângulo da taxa de propagação do incêndio; y eixo referente à direção do vento; $b + c = v$ taxa de avanço; $a = u$ taxa lateral (eixo menor); $b - c = w$ taxa de recuo.

A Figura 3.2 ilustra a frente de incêndio com vento na direção y .

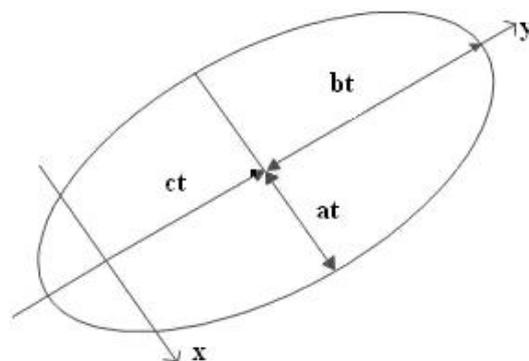


Figura 3.2: Frente do incêndio no tempo t com vento constante na direção y .

Fonte: RICHARD, 1990.

A frente de fogo no tempo t é representada parametricamente em coordenadas cartesianas em uma curva fechada $(x(s,t), y(s,t))$, onde $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Este sistema de coordenadas rege a direção e a velocidade do vento.

Os parâmetros envolvidos na determinação do crescimento do perímetro de incêndio, definidos como $b+c$, a e $b-c$, correspondem aos fatores relacionados ao tipo de combustível, umidade contida no combustível, velocidade do vento e condições topográficas para aquele ponto no tempo dt , que devem ser suficientemente pequenos para a, b, c e θ serem constantes neste período de tempo.

A nova frente de incêndio no tempo $t+dt$ (Figura 3.3) é agora definida por um perímetro externo de elipses, geradas em cada ponto na curva no tempo t . O ponto tangente, em contato com a elipse e o perímetro, a partir do ponto $(x(s,t), y(s,t))$, é definido como $(x(s, t+dt), y(s, t+dt))$.

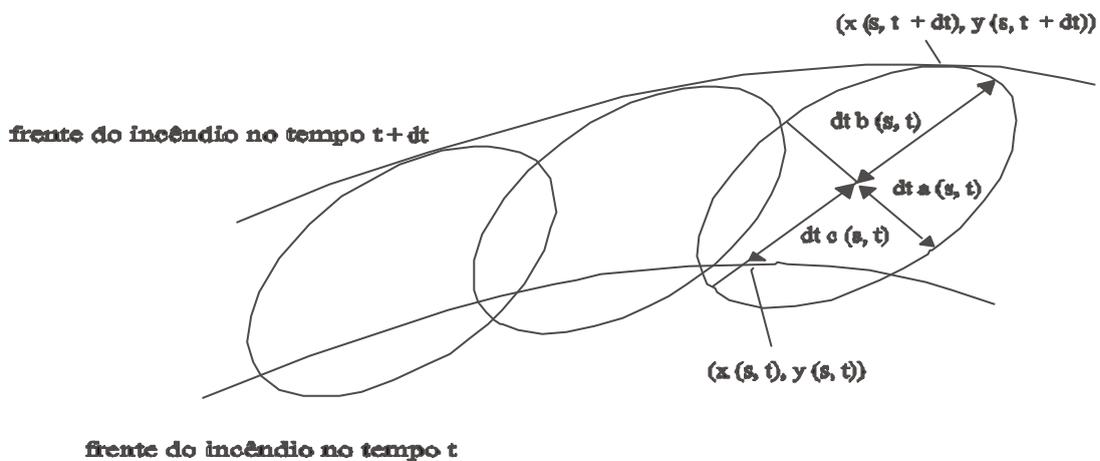


Figura 3.3: Envelope das elipses formando a frente de incêndio no tempo $t+dt$.

Fonte: RICHARD,1990.

Dados os pontos da curva $(x(s,t), y(s,t))$ e $(x(s, t+dt), y(s, t+dt))$ em $0 \leq \theta \leq 2\pi$, derivados no intervalo dt , obtém-se a derivada no tempo de $x_i(s,t)$ e $y_i(s,t)$ no limite de dt , que fornecerá o componente da taxa de propagação de incêndio de superfície para as dimensões x e y .

Para obter a derivada no tempo $x_i(s,t)$ e $y_i(s,t)$, calcula-se o ponto $(x(s,t+dt), y(s,t+dt))$, através de uma aplicação de transformação linear que transforma a elipse dentro de um círculo. Com esse procedimento o perímetro das elipses passa a ser de círculos, como mostra a Figura 3.4.

O cálculo das equações do perímetro dos círculos advém da aplicação da transformação linear inversa no ponto $(x(s,t+dt), y(s,t+dt))$ com ds , tendendo a zero.

Os eixos são rotacionados, de maneira que y é a direção do vento. A coordenada x é então o escalar definido como $b(s,t)/a(s,t)$. O passo seguinte é a aplicação da transformação resultando na equação (3.2):

$$X = [b(s,t)/a(s,t)](x \cos \theta - y \sin \theta) \tag{3.2}$$

$$Y = x \sin \theta + y \cos \theta$$

sendo θ representa o ângulo no sentido horário para o eixo y , definindo a direção e sentido da partícula do vento.

Estas transformações de cada elipse para o círculo de raio $dtb(s,t)$, com a distância do centro $dta(s,t)$ sobre os pontos gerados, estão apresentadas na Figura 3.4.

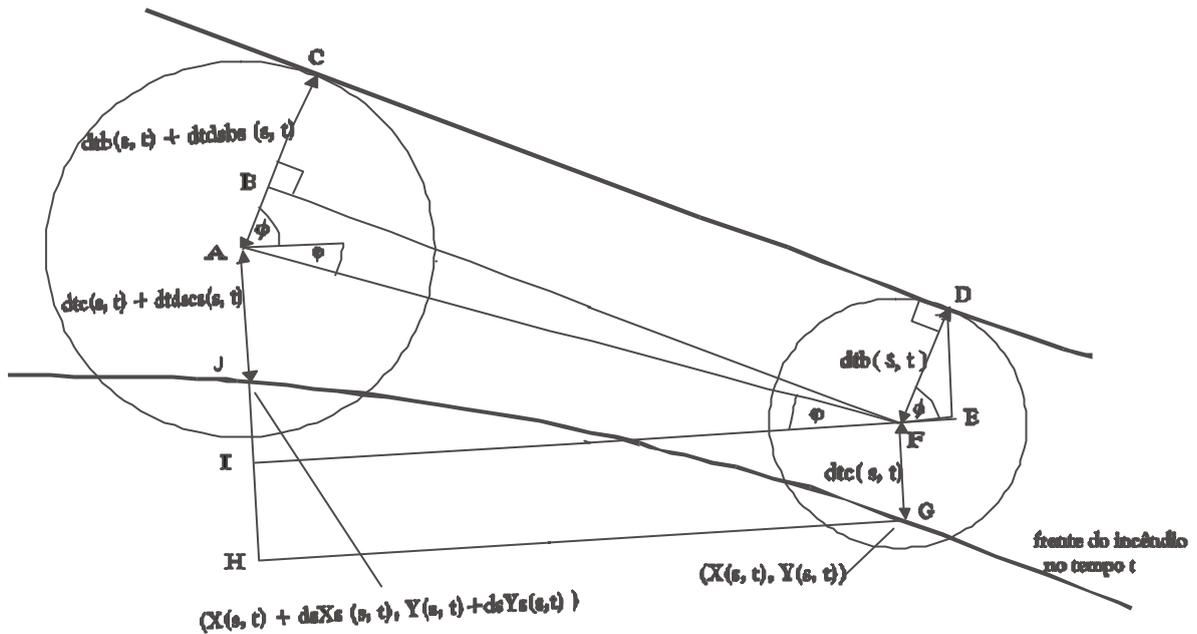


Figura 3.4: Frente do fogo transformada em círculo para o ponto s e $s+ds$.

Fonte: RICHARD, 1990.

A partir destas transformações, os círculos do envelope no tempo t nos pontos s e $s+ds$ na curva correspondem a $(s+ds, t)$ com raio $dtb(s+ds, t)$ e o seu centro está a uma distância de $dte(s+ds, t)$ sobre os pontos gerados. Os termos em ds são inferidos e são eliminados, quando ds tende a zero.

A coordenada X em D é dada então pela equação (3.3):

$$X(s, t) + EF = X(s, t) + dtb(s, t) \cos(\phi + \phi - \phi)$$

$$X(s, t) + EF = X(s, t) + dtb(s, t) (\cos(\phi + \phi) \cos \phi + \sin(\phi + \phi) \sin \phi) \quad (3.3)$$

Assim, como a coordenada Y em D é definida pela equação (3.4):

$$Y(s, t) + DE + FG = Y(s, t) + dtb(s, t) \sin(\phi + \phi - \phi) + dtc(s, t)$$

$$Y(s, t) + ED + FG = Y(s, t) + dtb(s, t) (\sin(\phi + \phi) \cos \phi - \sin \phi \cos(\phi + \phi)) + dtc(s, t) \quad (3.4)$$

Os cossenos e senos na Figura 3.4 são apresentados na seguinte equação:

$$\cos(\phi + \varphi) = AB/AF$$

$$\sin(\phi + \varphi) = \left((AF)^2 - (AB)^2 \right)^{1/2} / AF$$

$$\cos \varphi = FI/AF$$

$$\sin \varphi = \left((AF)^2 - (FI)^2 \right)^{1/2} / AF \quad (3.5)$$

sendo

$$AB = dt ds b_s(s, t)$$

$$AF = \left((AI)^2 + (FI)^2 \right)^{1/2} = ds \left((dt c_s(s, t) + Y_s(s, t))^2 + X_s^2(s, t) \right)^{1/2}$$

$$FI = -ds X_s(s, t)$$

Quando ds tender a zero, C tende a D , de maneira que CD será tangente a ambos os círculos e a coordenada de D tende para $(X(s, t + dt), Y(s, t + dt))$. Substituindo as equações (3.5) dentro de (3.3) e (3.4) e levando ds a zero, obtêm-se as equações:

$$\begin{aligned} X(s, t + dt) &= X(s, t) + \frac{dtb \left(-X_s dtb_s + (dtc_s + Y_s) \left((dtc_s + Y_s)^2 + X_s^2 - dt^2 b_s^2 \right)^{1/2} \right)}{\left((dtc_s + Y_s)^2 + X_s^2 \right)} \\ &= X(s, t) + P(s, t, dt) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} Y(s, t + dt) &= Y(s, t) + \frac{dtb \left(- \left((dtc_s + Y_s)^2 + X_s^2 - dt^2 b_s^2 \right)^{1/2} X_s - (dtc_s + Y_s)^2 dtb_s \right)}{\left((dtc_s + Y_s)^2 + X_s^2 \right)} + c dt \\ &= Y(s, t) + Q(s, t, dt) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Onde todas as funções do lado direito da expressão acima são desenvolvidas em função de (s,t) . As equações (3.6) e (3.7) determinam a formação do perímetro através dos círculos no tempo dt .

O termo da raiz quadrada na equação (3.6) pode se tornar complexo. Se esse fato ocorrer, significa que o raio da curva está crescendo, de maneira que o círculo em (s,t) irá ser completamente circundado por um círculo adjacente, resultando na não formação do perímetro. Este problema pode ser evitado estabelecendo-se dt suficientemente pequeno.

O seguinte passo corresponde à transformação das equações (3.6) e (3.7) para a coordenada (x,y) . Usando-se a inversa da equação (3.2) obtém-se a equação:

$$x_s = [a(s,t)/b(s,t)]X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (3.8)$$

$$y_s = -[a(s,t)/b(s,t)]X \sin \theta + Y \cos \theta$$

Substituindo X e Y dentro de P e Q obtém-se a expressão:

$$x(s,t+dt) - x(s,t) = [a(s,t)/b(s,t)]P(s,t,dt) \cos \theta + Q(s,t,dt) \sin \theta \quad (3.9)$$

$$y(s,t+dt) - y(s,t) = -[a(s,t)/b(s,t)]P(s,t,dt) \sin \theta + Q(s,t,dt) \cos \theta$$

Dividindo ambos os lados das equações (3.9) por dt , substituindo X e Y dentro de P e Q , e levando dt a zero, obtém-se as derivadas no tempo $x_t(s,t)$ e $y_t(s,t)$ nas seguintes equações:

$$x_t = \frac{a^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{\left(b^2 (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)^2 + a^2 (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta)^2 \right)^{1/2}} + c \sin \theta \quad (3.10)$$

$$y_t = \frac{-a^2 \operatorname{sen}\theta (x_s \operatorname{sen}\theta + y_s \operatorname{cos}\theta) - b^2 \operatorname{cos}\theta (x_s \operatorname{cos}\theta - y_s \operatorname{sen}\theta)}{\left(b^2 (x_s \operatorname{cos}\theta - y_s \operatorname{sen}\theta)^2 + a^2 (x_s \operatorname{sen}\theta + y_s \operatorname{cos}\theta)^2 \right)^{1/2}} + c \operatorname{cos}\theta \quad (3.11)$$

As equações (3.10) e (3.11) descrevem a velocidade de propagação do fogo ortogonal em cada vértice, baseadas no crescimento dos perímetros formados por pequenas elipses, sujeito às seguintes condições iniciais:

$$x(s,0) = x_0(s) \quad (3.12)$$

$$y(s,0) = y_0(s)$$

Fazendo θ tender a zero e aproximando um ponto fonte de ignição como uma pequena elipse obtém-se a equação:

$$x_0(s) = a \, dt \operatorname{cos} s \quad (3.13)$$

$$y_0(s) = b \, dt \operatorname{sen} s + c \, dt$$

A elipse é determinada pela equação (3.14):

$$x(s,t) = a (t + dt) \operatorname{cos} s \quad (3.14)$$

$$y(s,t) = b (t + dt) \operatorname{sen} s + c (t + dt)$$

As equações apresentam importantes características como: compõem um sistema de equações diferenciais de primeira ordem que podem ser solucionadas numericamente; os parâmetros a , b , e c para um incêndio são obtidos por meio de dados coletados em campo.

3.3.2 - Transformação da Inclinação do Terreno

As equações de RICHARDS (1990-1995) foram desenvolvidas para terrenos planos. Para utilização em terreno com declividade, é utilizado um corretor de inclinação. A correção da inclinação é usada para traduzir as coordenadas de superfície da frente do incêndio em coordenadas horizontais. Assim, a projeção horizontal de uma área de incêndio na forma de uma elipse em uma topografia irregular irá aparecer nivelada nas direções ascendente e descendente do terreno. Adicionando ou subtraindo o corretor de inclinação dependendo da orientação de cada vértice, tem-se:

$$x_s = (x_{i-1} - x_{i+1}) \pm D_i \operatorname{sen} \omega_i \quad (3.15)$$

$$y_s = (y_{i-1} - y_{i+1}) \pm D_i \operatorname{cos} \omega_i$$

sendo x_s e y_s expressões que determinam a direção normal da frente do incêndio para cada vértice (x_i, y_i) , D_i (medida em metros) diferença entre a distância medida do segmento do perímetro $(x_{i-1}, y_{i-1}) - (x_{i+1}, y_{i+1})$ na horizontal e a inclinação do plano local para cada vértice (equação (3.16)) e ω_i (radiano) direção da orientação do vértice. Para D_i , tem-se a seguinte expressão:

$$D_i = \left[(x_{i-1} - x_{i+1})^2 + (y_{i-1} - y_{i+1})^2 \right]^{1/2} \operatorname{cos} \delta_i (1 - \operatorname{cos} \phi_i) \quad (3.16)$$

sendo ϕ_i (radiano) inclinação local na direção da orientação e δ_i diferença entre a direção da orientação e a orientação do ângulo do segmento do perímetro no sistema de coordenadas de superfície, isto é,

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\omega_i - \alpha_i)}{\operatorname{cos} \phi_i} \right) \quad (3.17)$$

sendo α_i a orientação do ângulo do segmento do perímetro no plano horizontal.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left[\frac{(y_{i-1} - y_{i+1})}{(x_{i-1} - x_{i+1})} \right] \quad (3.18)$$

Estes valores são aproximações do ângulo normal da frente do incêndio, pois os vértices usados para calcular D_i podem estar em diferentes planos na topografia heterogênea.

Um procedimento similar é usado para transformar a taxa de propagação $(x_t$ e $y_t)$ para o plano horizontal $(x'_t$ e $y'_t)$:

$$x'_t = x_t \pm D_r \text{ sen } \omega_i \quad (3.19)$$

$$y'_t = y_t \pm D_r \text{ cos } \omega_i \quad (3.20)$$

sendo D_r a diferença da taxa de propagação entre o plano horizontal e o plano da inclinação local na direção da orientação do fogo, definido por:

$$D_r = [x_t^2 + y_t^2]^{1/2} \cos \left(\omega_i - \tan^{-1} \left(\frac{y_t}{x_t} \right) \right) (1 - \cos \phi_i) \quad (3.21)$$

3.3.3 – Efeitos do Vento e Topografia

O efeito do vento e a topografia são calculados para incêndio de superfície, usando os coeficientes da velocidade do vento no meio da chama ϕ_w e a topografia ϕ_s determinados no modelo de ROTHERMEL, equações (3.22) e (3.23a - 3.23b). Nos incêndios de superfície, o vento é considerado no meio da chama. Nos incêndios de copa assume-se o mesmo coeficiente, mas com um fator de redução 0.4 (ROTHERMEL, 1991).

$$V = V_0(1 + \phi_w + \phi_s) \quad (3.22)$$

sendo V_0 taxa de propagação sem vento e com declividade nula, ϕ_w fator que adiciona o crescimento devido à velocidade do vento, ϕ_s fator de inclinação. Os fatores são definidos como:

$$\phi_w = AV^B \quad (3.23a)$$

$$\phi_s = E \tan^2 \theta_s \quad (3.23b)$$

sendo θ_s é o ângulo entre a inclinação do terreno e o plano horizontal (equação 3.24). Os valores de A , B e E dependem da razão da área da superfície pelo volume, como é mostrado na Tabela 3.1, e os valores da razão de *packing* (Anexo I).

$$\tan \theta = \frac{V}{W} \quad (3.24)$$

sendo W a velocidade vertical dos gases da chama.

Tabela 3.1: Coeficientes A , B e E funções da área da superfície pelo volume.

s cm ⁻¹	A U m/s	B	E	Razão do compactação (<i>Packing</i>)
285	1,46	3,38	34,03	0,0020
154	2,52	2,43	29,29	0,0033
69	3,97	1,57	24,01	0,0064
40	4,77	1,17	21,03	0,0099

3.3.4 - Dimensões da Elipse

Os parâmetros a, b, c nas equações (3.10) e (3.11) descrevem uma região de incêndio em uma forma de elipse em um dado vértice. A região do incêndio é determinada com bases empíricas e em função de dados da velocidade do vento. A forma pode ser afetada de diferentes maneiras pelo vento e inclinação do terreno, devido à transferência de calor por convecção e radiação na propagação do incêndio.

A forma da elipse é definida pela razão do comprimento pela largura (LB), determinando a excentricidade da região do incêndio na presença de fortes ventos determinados através da equação (3.25):

$$LB = 0.936 e^{(0.2566U)} + 0.461 e^{(-0.1548U)} - 0.397 \quad (3.25)$$

Considerando-se o foco real da elipse como a origem do incêndio assume-se a razão do recuo pelo avanço do incêndio (HB) que é definido pela equação:

$$HB = - \left(\frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}} \right) \quad (3.26)$$

Os parâmetros a, b e c dos eixos da elipse (usados nas equações (3.10) e (3.11)) são calculados utilizando a taxa de propagação do incêndio de superfície ou de copa:

$$a = 0.5 \frac{(R + R/HB)}{LB} \quad (3.27a)$$

$$b = \frac{(R + R/HB)}{2.0} \quad (3.27b)$$

$$c = b - \frac{R}{HB} \quad (3.27c)$$

O sistema FARSITE através da combinação dos modelos descreve o comportamento do incêndio, admitindo uma seqüência de atividades do fogo. Primeiro, o incêndio pode propagar-se através do combustível de superfície, se as condições ambientais permitirem, o incêndio irá se acelerar em direção à nova condição de equilíbrio de propagação. Na presença de combustível potencial, clima e topografia, o incêndio pode passar a queimar o combustível aéreo, se o combustível da copa é ignitado, pode-se considerar as árvores como tocha. A partir disto, ocorre a elevação das fagulhas e o seu transporte.

3.3.5 - Modelos de Comportamento de Incêndio

Os modelos que descrevem o comportamento do incêndio são obtidos de um processo tridimensional de combustão não confinado que relaciona implicitamente o ambiente através das trocas de calor e de massa. No FARSITE, os modelos de incêndio separados são combinados por meio da aproximação do Princípio de Huygens.

3.3.5.1 - Incêndio de Superfície

O modelo usado no FARSITE para descrever a taxa de propagação do incêndio de superfície é o de ROTHERMEL. A equação principal deste modelo é a (2.41) mostrado no Capítulo 2, na seção 2.3.1, que representa a forma aproximada da taxa de propagação de incêndio de superfície. Esta equação representa um balanço de energia dentro de uma unidade de volume do combustível à frente da chama. A equação (2.41) demonstra que a taxa de propagação R é a proporção entre a taxa de aquecimento do combustível e a energia necessária para levar o mesmo combustível à ignição.

A determinação da intensidade da linha de fogo é obtida por meio da equação desenvolvida por BYRAM (1959). Esta equação descreve a taxa de energia liberada por unidade de comprimento da frente do fogo. A expressão é mostrada no Capítulo 2, seção 2.3.1.4.

3.3.5.2 - Incêndio de Copa

O modelo de incêndio de copa usado no FARSITE é o descrito por VAN WAGNER (1993). O modelo estabelece que a transição do incêndio para o combustível aéreo depende do conteúdo da umidade foliar (M) e a altura da base da copa (CBH). Assim, a intensidade do fogo na copa I_o é calculada pela expressão:

$$I_o = (0.010 CBH(460 + 25.9M))^{3/2} \quad (3.28)$$

O tipo de incêndio de copa depende do limite da taxa de propagação do incêndio de copa ativo (RAC) que é definido pela expressão:

$$RAC = \frac{3.0}{CBD} \quad (3.29)$$

sendo CBD a densidade de biomassa da copa.

No modelo de VAN WAGNER (1993), são definidos três tipos de incêndio de copa determinados através I_o e RAC :

- 1 - Incêndio de copa passivo ($I_b \geq I_o$ mas $R_{atual} < RAC$);
- 2 - Incêndio de copa ativo ($I_b \geq I_o, R_{atual} \geq RAC, E < E_o$);
- 3 - Incêndio de copa independente ($I_b > I_o, R_{atual} \geq RAC, E > E_o$).

Com E e E_o representando o fluxo de energia crítica e atual no avanço do fogo.

O incêndio de copa independente não é considerado no modelo FARSITE, pois se admite que este tipo de incêndio é raro e de pequena duração. Admite-se também que a taxa de propagação de incêndio de copa passivo é igual à do incêndio de superfície. A taxa de propagação de incêndio de copa máxima é determinada pela expressão:

$$R_{catual} = R + CFB(R_{c\ max} - R) \quad (3.30)$$

Com R_{catual} igual ou maior que RAC :

$$R_{c\ max} = 3.34 R_{10} E_i \quad (3.31)$$

A máxima taxa de propagação de incêndio de copa $3.34R_{10}$ é determinada através do modelo de ROTHERMEL (1991) para a taxa de propagação de incêndio de superfície. A densidade de massa da copa (CFB) é a fração queimada da copa definida como a proporção das árvores envolvidas na fase do incêndio definida como:

$$CFB = 1 - e^{-a_c(R-R_o)} \quad (3.32)$$

sendo a_c o coeficiente para a fração queimada da copa.

$$a_c = \frac{-\ln(0.1)}{0.9(RAC - R_o)} \quad (3.33)$$

$$R_o = I_o \frac{R}{I_b} \quad (3.34)$$

3.3.5.3 - Aceleração do Incêndio

A aceleração do incêndio é definida como o aumento na taxa de propagação para uma dada fonte de ignição devido ao aumento de combustível seco durante o dia ou pelo aumento da velocidade do vento. O modelo utilizado no FARSITE procura eliminar a ocorrência de saltos instantâneos, levando à taxa de propagação rápida, ao determinar a aceleração do incêndio. A taxa de propagação é dependente somente do tempo para determinar a aceleração da taxa máxima, sobre determinadas condições:

$$R_t = R(1 - e^{-a_a t}) \quad (3.35)$$

sendo R a taxa de propagação em equilíbrio, t é o tempo decorrido e a_a é a constante que determina a taxa de aceleração. Assume-se que a taxa de aceleração é independente do comportamento do fogo.

A taxa de aceleração de incêndio de copa é determinada de forma similar

$$a_{c_a} = a_a - 18.8CFB^{2.5} e^{(-8CFB)} \quad (3.36)$$

O coeficiente a_a de aceleração depende do tipo de combustível e se a fonte de fogo é pontual ou em linha. A equação (3.36) pode ser integrada para solucionar a distância de propagação (D) depois de um dado tempo decorrido t :

$$D = R \left(t + \frac{e^{-at}}{a_a} - \frac{1}{a_a} \right) \quad (3.37)$$

O passo seguinte é calcular o tempo para o incêndio propagar-se a uma dada distância, onde D_t é a distância da taxa de propagação corrente e D_{t+1} é a distância da taxa de propagação no próximo passo de tempo.

$$D_t = R \left(T_t + \frac{e^{-a_a T_t}}{a_a} - \frac{1}{a_a} \right) + D_{t+1} \quad (3.38)$$

sendo T_t o tempo necessário para alcançar a taxa de propagação atual, escrita da seguinte forma:

$$T_t = \frac{\ln(1 - R_t/R)}{a_a} \quad (3.39)$$

3.3.5.4 - Umidade do Combustível

A umidade do combustível da madeira morta varia no tempo em função do tamanho da partícula do combustível, das condições climáticas e da exposição ao vento e ao sol. A umidade do combustível morto depende do aquecimento e da secagem através da radiação solar. Os modelos incorporam os efeitos da energia solar recebida durante as horas do dia no cálculo da umidade. A radiação solar é atenuada por meio da geometria do ângulo do sol e do terreno para uma dada latitude, data e a hora do dia. Pode-se também considerar a redução da energia solar pela presença de nuvens e cobertura da copa.

Para representar o comportamento do incêndio de superfície e do material combustível no FARSITE, precisa-se de quatro dados geográficos para a realização da simulação, são eles: elevação, declividade, orientação das encostas e vegetação. Uma das dificuldades na utilização do FARSITE é a necessidade de mapas de vegetação para gerar os mapas de combustível. Além disso, a maioria das bases de dados de vegetação existente não quantifica as informações do combustível no nível de detalhamento ou de

resolução necessária pelo FARSITE. Uma outra limitação do modelo é com relação às variáveis de direção e intensidade do vento. Embora haja um grande avanço na modelagem e técnicas de simulação, ainda há dificuldade na representação com precisão dos vetores de vento sobre uma topografia irregular. No FARSITE assumiu-se que os ventos são paralelos ao terreno, podendo variar a sua intensidade e a direção ao longo do tempo. A velocidade dos ventos é ajustada para altura do meio da copa baseado nas características da copa e no tipo de combustível.

A ocorrência de *spotting* é produzida quando deseja assimilar o desenvolvimento do incêndio de copa. Contudo, o modelo que descreve o incêndio ao nível de copa das árvores não necessariamente representa o transporte de partícula em ignição. Deste modo, podem-se subestimar ambos os tamanhos da partícula em ignição, a altura desta partícula e por último a distância de *spotting* sobre as condições do modelo de incêndio de copa.

A determinação do perímetro do fogo e o seu comportamento no FARSITE requererem o emprego de aplicações de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para gerar os dados da paisagem. Estas vantagens, contudo, exigem mais informações de topografia, combustível e condições meteorológicas. A projeção do comportamento do avanço da frente do incêndio é altamente dependente da precisão e resolução dos dados temporais e espaciais. Sendo assim, a precisão da simulação passa a ser mais dependente destes dados. As predições do crescimento dos incêndios utilizando o FARSITE dependem muito da precisão da entrada dos dados necessárias para executar espacialmente os modelos.

3.4 - Sistemas de Informação Geográfica

Uma tecnologia usada no presente trabalho é o Sistema de Informação Geográfica (SIG). O SIG tem permitido realizar o tratamento de informação geográfica em nível digital. Neste trabalho, é usado na interseção espacial de vários temas, para obter como resultado final um mapa – síntese ou a composição da paisagem.

O SIG pode integrar espacialmente um conjunto de variáveis de uma determinada área tais como: vegetação, topografia, climatologia e histórico de eventos de fogo. A análise geográfica dos dados com SIG preserva a dimensão espacial das variáveis no processamento, porque as transformações são realizadas cartograficamente. Devido a esta capacidade, muitos trabalhos utilizam o SIG no manejo de incêndios florestais e no mapeamento de risco de fogo (VASCONCELOS *et al.*, 1992, CHUVIECO *et al.*, 1997).

3.5 – Materiais e Métodos

3.5.1 – Materiais

3.5.1.1 – Preparação dos Dados

Para a realização das simulações utilizando o FARSITE é necessária uma série de etapas que começam com: 1) entrada de variáveis constantes que vão compor a paisagem; 2) entrada de variáveis dinâmicas relacionadas com as propriedades do combustível tais como o conteúdo de umidade e aspectos físicos do combustível e as condições atmosféricas; 3) definição dos parâmetros para execução da simulação: o fator de ajuste da velocidade de propagação, os ajustes opcionais relacionados com o modelo de incêndio que é simulado, duração da simulação e entrada do ponto de ignição; 4) e, finalmente, o processo de execução com geração dos dados de saída como: área, perímetro, velocidade de propagação e intensidade do fogo (Figura 3.5). Para o processamento dos dados de entrada, foi preciso o auxílio de um sistema de informação geográfico (SIG), que neste trabalho utilizou-se o software *ArcView*. A Figura 3.5 apresenta as etapas do processo de execução do FARSITE

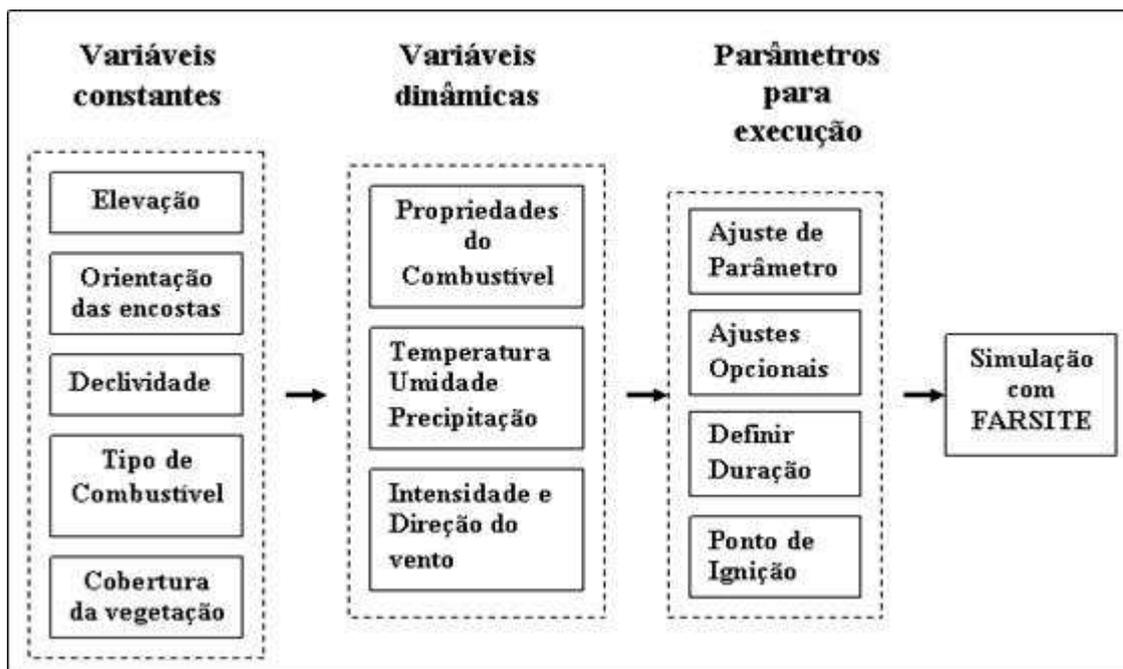


Figura 3.5: Fluxograma do processo de execução do FARSITE.

Adaptado da Fonte: FINNEY, 1998.

3.5.2 - Método

3.5.2.1 – Dados de Entrada do FARSITE

A primeira etapa, conforme mostrado na Figura 3.5, para executar uma simulação de incêndio é necessário a determinação dos componentes principais do padrão da paisagem. Estes componentes referem-se à composição da paisagem e a sua estrutura que corresponde ao seu arranjo no espaço, posição e orientação. Para geração desta paisagem, são utilizados cinco arquivos espaciais (temas). Os arquivos são: elevação, declividade, orientação das encostas, cobertura vegetal e tipo de combustível.

O dado de elevação foi obtido por meio do modelo numérico do terreno (MNT). O MNT é definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de um conjunto de pontos. Este conjunto de pontos é gerado através da digitalização de isolinhas¹⁰ a partir de mapas existentes ou em valores computados por meio de imagens digitais, como é o caso de altimetria (curvas de nível).

¹⁰ Isolinhas: são linhas definidas como uma série de coordenadas x e y , com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua da superfície.

O modelo numérico do terreno foi obtido através do Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO, 2000), por meio de um arquivo digital com extensão *.tin na escala de 1:10.000 e em projeção UTM (datum SAD 69). O MNT da Floresta da Tijuca é representado por uma grade triangular e com a altimetria variando 0.1-1022 metros. Este modelo representa uma superfície através de um conjunto de triângulos interligados, como uma estrutura vetorial de tipologia nó-arco. Para cada um dos três vértices da face do triângulo, são armazenadas as coordenadas (x,y) e o atributo z, correspondente ao valor de elevação ou altitude. A partir deste modelo, é gerado o mapa de elevação (Figura 3.5), que utiliza o tamanho de célula de 4 metros (linha 4582 e coluna 5892). Adotou-se este tamanho de célula, pois os eventos de focos de fogo registrados na Floresta da Tijuca são de pequena dimensão. Para simulação de incêndios de grandes extensões, o tamanho adotado deve ser maior, por exemplo, 20 metros. Esta característica vai influenciar na velocidade de simulação de incêndio florestal.

A área considerada do maciço da Tijuca é a partir da cota 40m. A escolha desta cota se deve por esta demonstrar-se como a de maior representatividade do maciço, visto que a cota 20m se propaga pelo município e confunde-se com a área de baixada e com o maciço da Pedra Branca (FERNANDES, 1998).

A partir do mapa de elevação, são gerados os mapas de declividade e de orientação da encosta (Figura 3.6 e 3.8). Para geração desses mapas, utiliza-se a função SURFACE do programa *ArcView*. O de declividade foi fatiado em seis classes, segundo a classificação proposta por FRANCISCO (1995), baseada na legislação de uso do solo como parâmetro de ocupação e como variável para a indicação de características morfológicas do terreno (FERNANDES, 1998). O mapa de aspectos foi fatiado com o propósito de separar as encostas voltadas para o norte e para o sul.

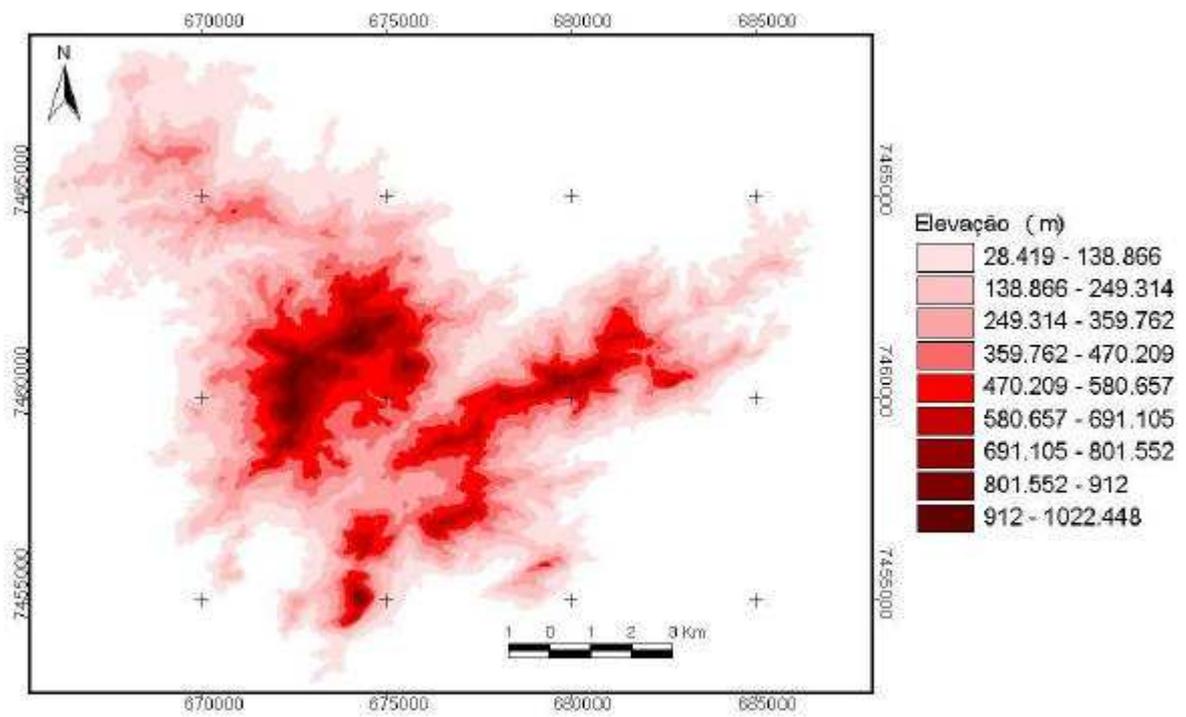


Figura 3.6: Mapa de elevação do terreno (m) do maciço da Tijuca/RJ.

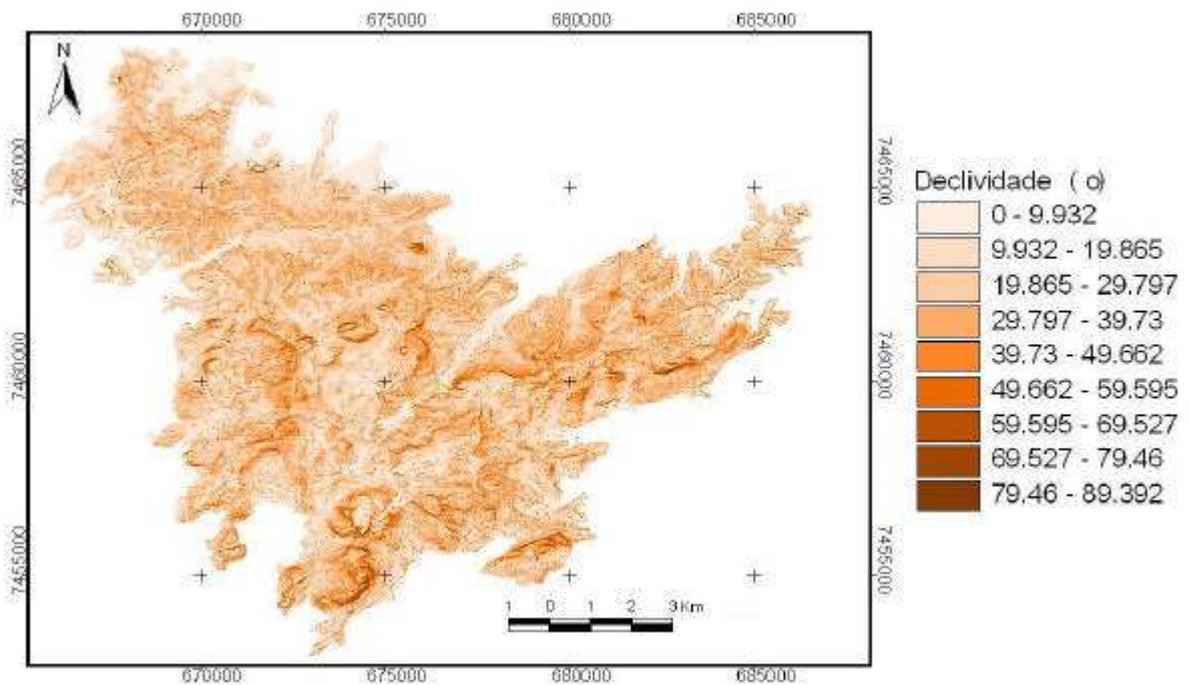


Figura 3.7: Mapa de inclinação do terreno (°) do maciço da Tijuca/RJ.

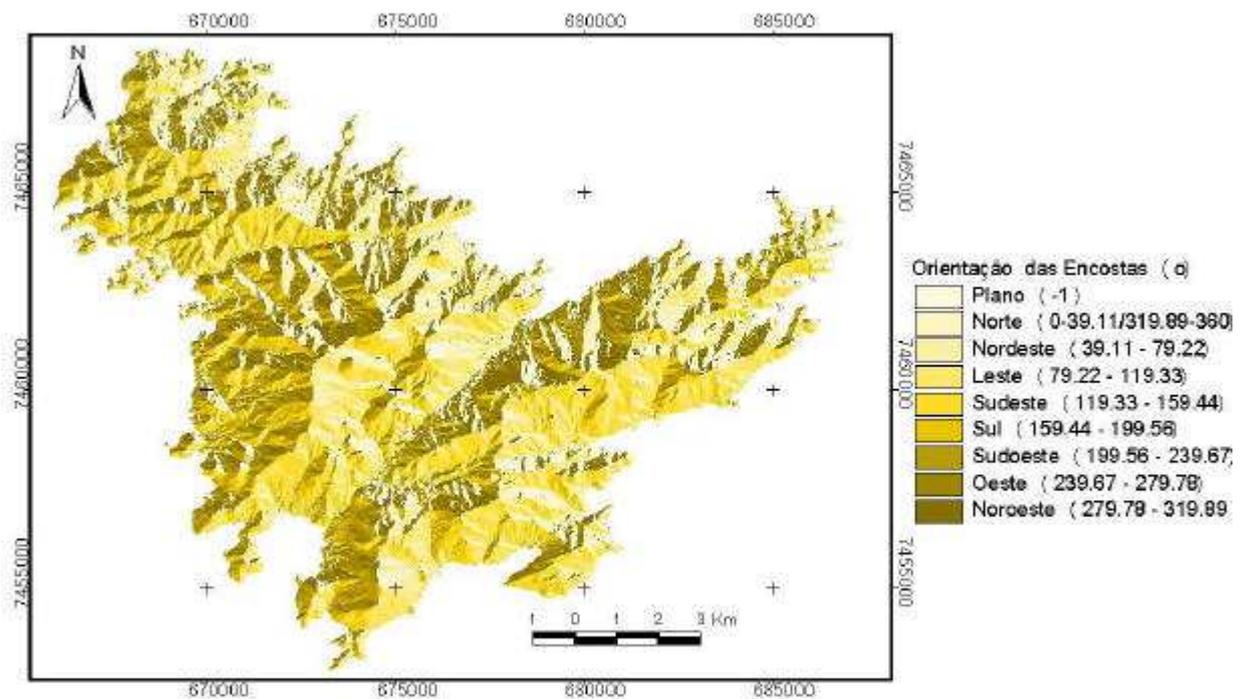


Figura 3.8: Mapa da orientação da encosta (°) do maciço da Tijuca/RJ.

3.5.2.2 – Definição dos Modelos de Combustível para Representar a Paisagem

Os modelos de combustível contêm informações dos parâmetros relacionados com as propriedades físicas dos combustíveis tais como: tipo de combustível herbáceo e lenhoso, área da superfície do combustível pelo volume, entre outras propriedades que foram mostradas no Capítulo 2. Estes modelos desenvolvidos por ROTHERMEL são também utilizados no BEHAVE (ANDREWS, 1986) e NFDRS (BRADSHAW *et al.*, 1984).

No FARSITE, há três maneiras de definir estes modelos: Primeiro, utilizando os modelos de combustível padrão de 1 a 13 estabelecidos no programa (Anexo II); Segundo, utilizar o editor do modelo de combustível personalizado, onde são definidos os parâmetros dos modelos empregados (14 ao 50) e, por último, pode-se utilizar o editor de conversão do combustível aplicado nos casos onde os tipos de combustível (cobertura vegetal) não correspondem aos 13 modelos padrões do programa, sendo necessário converter estes modelos para outros mais apropriados.

Neste trabalho, utiliza-se os modelos padrões, devido à dificuldade de quantificar as propriedades físicas dos combustíveis. No modelo de combustível que representa a interface vegetação e meio urbano usou-se o modelo personalizado. A partir do mapa de uso e cobertura do solo (Figura 3.9) é realizada a reclassificação usando como base os modelos de tipos de combustíveis definidos no FARSITE, conforme mostrados na Tabela 3.2. A Figura 3.10 apresenta o mapa do modelo de combustível resultante da reclassificação.

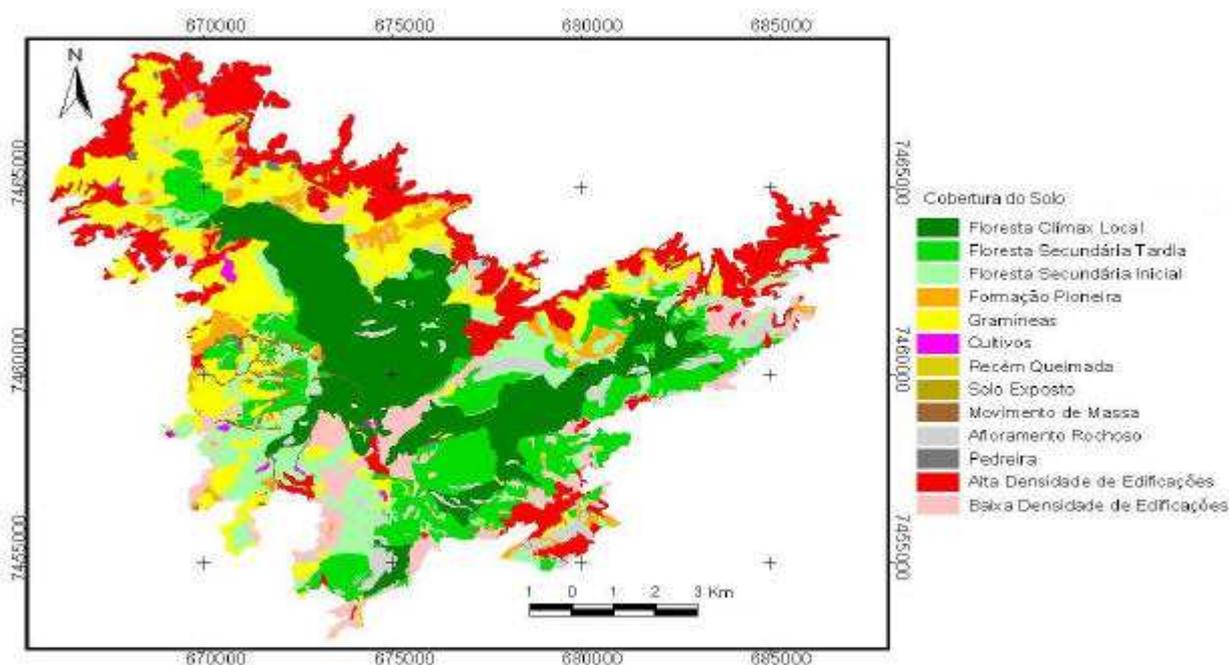


Figura 3.9: Mapa de uso e cobertura do solo do maciço da Tijuca/RJ.

Fonte: GEOHECO, 2000.

Tabela 3.2: Tipos de combustível utilizados no FARSITE.

Modelo de Combustível	Tipologia Vegetal*	Modelo de Combustível
2	Formação Pioneira	Floresta (gramíneas e subbosque)
3	Gramíneas	Gramíneas (2,5ft)
5	Cultivo	Brush (2ft)
6	Floresta Secundária Inicial	Dormant Brush Hardwood Slash
8	Floresta Clímax	Litter e Floresta Fechada
10	Floresta Secundária Tardia	Floresta (litter e subbosque)
20	Interface Paisagem/urbano	—

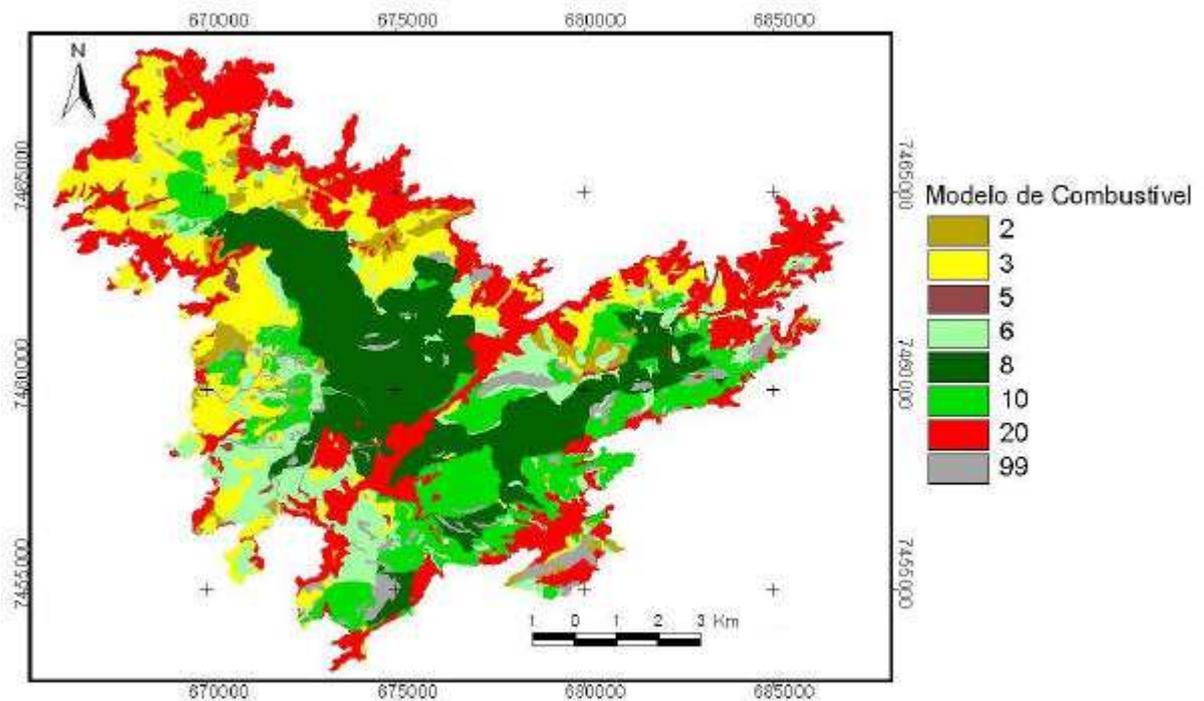


Figura 3.10: Mapa do modelo de combustível.

O mapa da cobertura da copa (biomassa aérea) também é obtido a partir do mapa de uso e cobertura do solo. A cobertura da copa média é necessária para calcular a umidade do combustível e ajustar os dados de vento sobre a copa das árvores. A cobertura da copa em percentagem é a projeção vertical média da cobertura da copa das árvores e refere-se à estimativa da área ocupada pela vegetação. Neste trabalho, utilizou-se cinco classes variando de 1 a 100% para agrupar os modelos utilizados para as classes de combustíveis. Todo o processo de classificação foi realizado no software *Arcview*. A Figura 3.11 mostra o mapa de percentagem de cobertura resultante do agrupamento das classes de cobertura de copa. As categorias utilizadas são listadas abaixo:

- Categoria 1 – 1 a 20%
- Categoria 2 – 21 a 50%
- Categoria 3 – 50 a 80%
- Categoria 4 – 81 a 100%

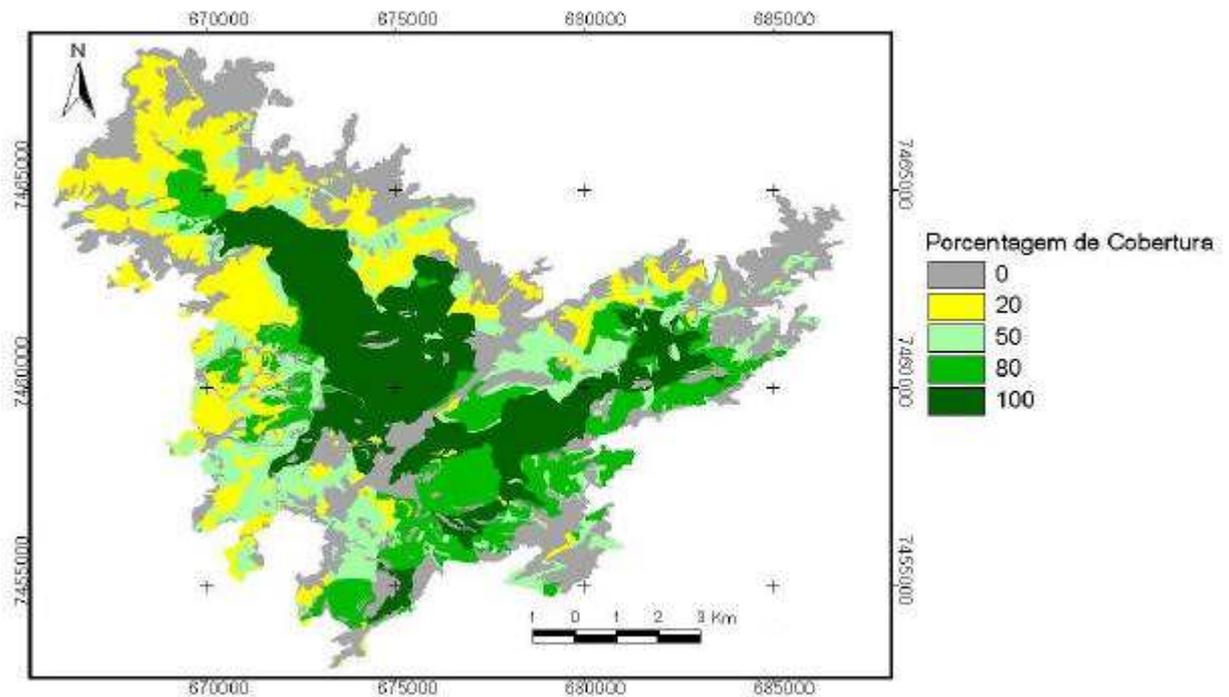


Figura 3.11: Mapa de percentagem de cobertura.

Estes dados são as bases para construir a paisagem (mapa síntese). Os mapas gerados no *ArcView* são exportados no formato ASCII Raster. Outros dados opcionais podem ser utilizados tais como: altura da árvore, altura da base árvore e carga de serrapilheira.

A partir da definição das classes de combustível são gerados dois arquivos. O primeiro refere-se ao fator de ajustamento utilizado para ajustar a taxa de propagação e é específico para cada classe de combustível. Para determinar este fator, foram realizadas simulações utilizando dados experimentais. O segundo arquivo corresponde à umidade do combustível inicial e também é específico para a classe usada. Neste arquivo é necessário entrar com os seguintes parâmetros: o tipo de combustível definido anteriormente, os valores de umidade do material combustível referente às categorias de 1 hora, 10 horas, 100 horas e a umidade correspondente ao combustível vivo herbáceo (LiveH) e combustível vivo lenhoso (LiveW). Estes parâmetros são comentados no Capítulo 2, na seção 2.3.1.

3.5.2.3 – Processamento dos Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos são obtidos através das duas plataformas de coleta de dados – PCD's. Esta etapa do trabalho é descrita no Capítulo 2. Estes dados são divididos em dois arquivos. O primeiro arquivo é o do clima formado pelos dados: mês, dia, hora, precipitação, temperatura, umidade e elevação. O segundo arquivo refere-se aos dados de vento formado pela intensidade e direção do vento e cobertura de nuvens. Após esta fase, são definidos os arquivos referentes às condições atmosféricas dos dias de maior susceptibilidade ao fogo.

3.5.2.4 – Definição dos Pontos de Ignição

A determinação dos pontos de ignição baseou-se nos dados de eventos de focos de fogo registrados na área de estudo. Estes eventos foram correlacionados com os dados de índice de risco de incêndio mostrados no Capítulo 2. A partir destas informações escolheram-se pontos com alta e baixa suscetibilidade. Cada ponto possui informações tipo de combustível, declividade, elevação, orientação das encostas, cobertura da vegetação e umidade do combustível, além, das suas coordenadas geográficas. Na Figura 3.12, é mostrado a localização dos pontos de ignição e a das PCD's.

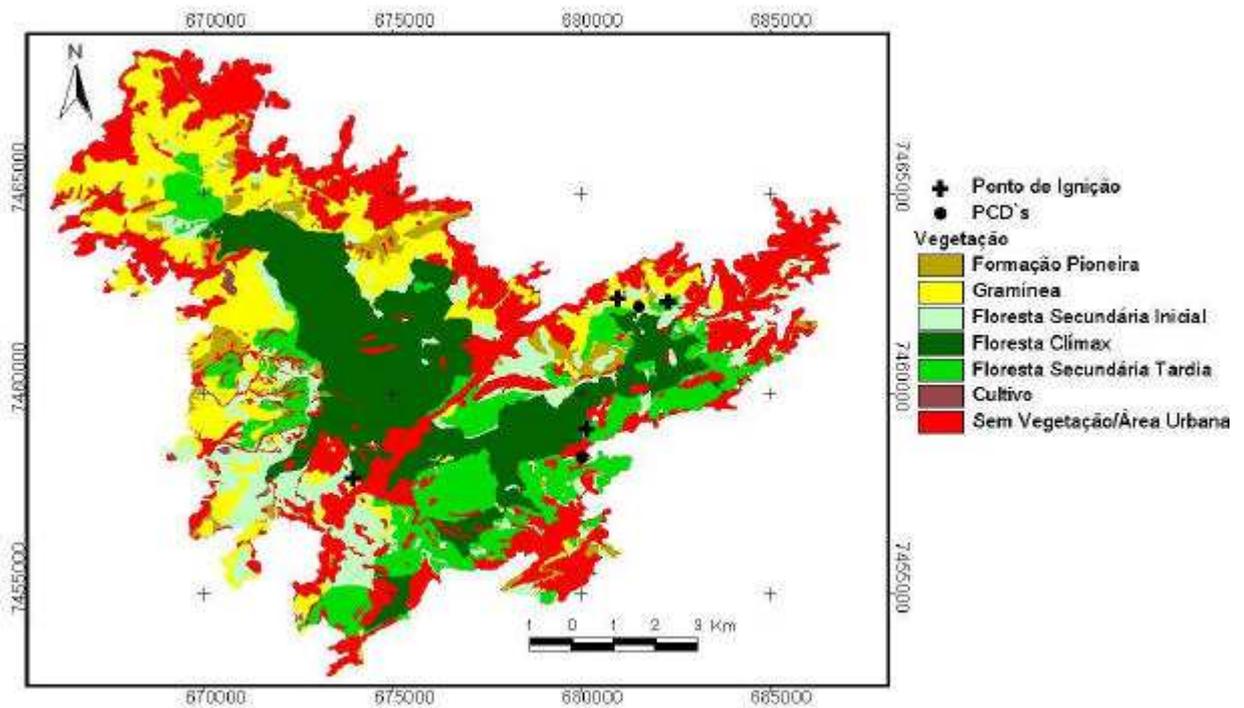


Figura 3.12: Localização dos pontos de ignição.

3.5.2.5 – Estabelecimento das Condições para a Simulação

Para a realização das simulações é necessária a determinação de alguns parâmetros que são: a) Passo de tempo do avanço do fogo; b) Resolução do perímetro que se refere à distância máxima entre os pontos do perímetro de incêndio na direção tangencial; c) Resolução da distância que é uma resolução radial da propagação do incêndio para cada ponto.

3.6 – Construção de Cenários de Frente de Fogo para o PARNA-Tijuca

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados e a construção de cenários para a realização de simulações computacionais do avanço da frente de fogo no Parque Nacional da Tijuca (PARNA-Tijuca), utilizando como ferramenta computacional o FARSITE (FINNEY, 1998). É feito também uma análise do seu desempenho e das limitações. Para tal, são testadas diferentes situações, utilizando dados experimentais para a realização de ajuste, condições atmosféricas e vegetação da PARNA-Tijuca.

3.6.1 – Análise da Distribuição da Intensidade e Direção do Vento na PARNA-Tijuca

O vento é uma das variáveis ambientais que mais influencia a forma e a velocidade de propagação do fogo. Esta variável atua sobre a velocidade de avanço de incêndio através do aumento na transferência de calor para frente da chama, tanto por radiação quanto por convecção. A intensidade e direção do vento variam diariamente e sazonalmente. A configuração da bacia hidrográfica é forte condicionante local, que pelo sistema orográfico e a topografia, impõe uma circulação atmosférica local.

Deste modo, a análise da distribuição da intensidade e direção do vento no Parque Nacional da Tijuca tem como objetivo fornecer subsídios para avaliação das simulações numéricas realizadas no FARSITE. Para tal, utilizam-se os dados das duas plataformas de coleta de dados – PCD's instaladas no Sumaré e no Horto, localizada no maciço da Tijuca. O período analisado, como dito anteriormente, corresponde aos anos de 2003 e 2004.

A maior concentração de incêndios ocorre no período de junho a agosto, conforme resultados observados no Capítulo 2. Isto é verificado através da ocorrência de eventos de focos de fogo registrados no PARNA-Tijuca. Também é este período que apresentou maiores índices de susceptibilidade de risco de fogo (Tabelas 2.5 A-B).

Nas Figuras 3.13 a 3.14, são apresentados os resultados referentes ao comportamento da direção e intensidade do vento no período de junho a agosto nos anos de 2003 e 2004.

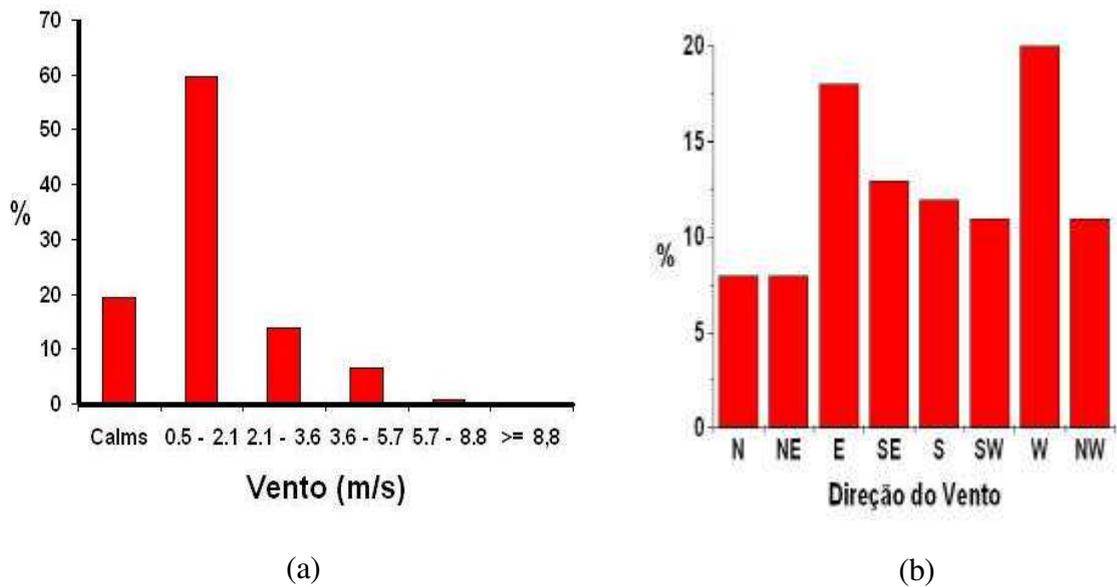


Figura 3.13: (a)-(b) Intensidade e direção do vento na estação do Sumaré para o mês de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.

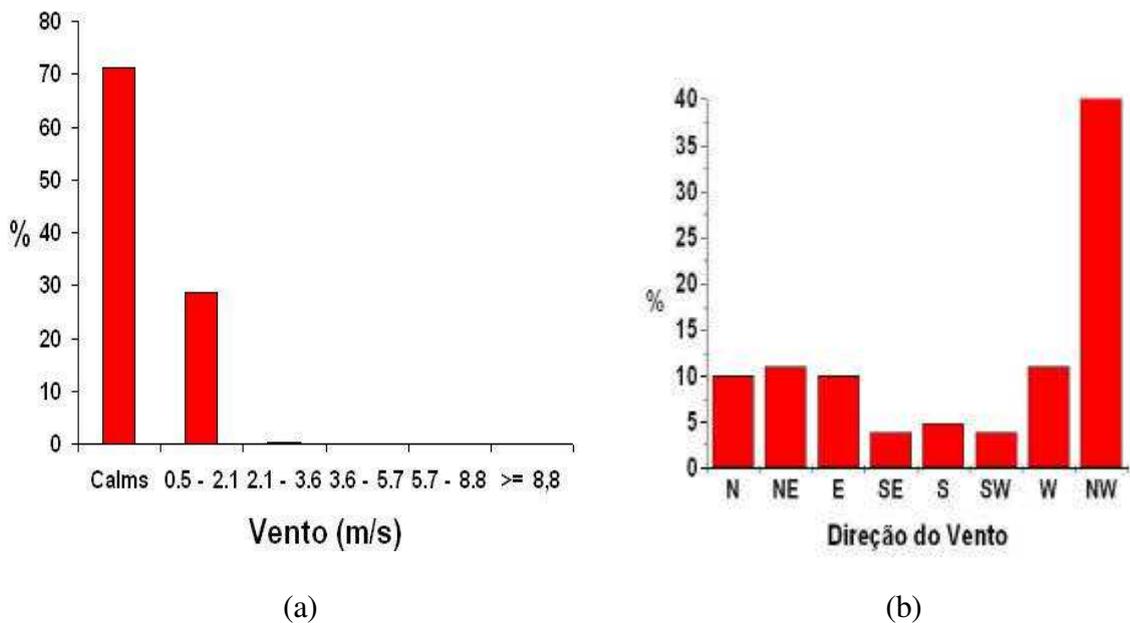


Figura 3.14: (a)-(b) Intensidade e direção do vento na estação do Horto para o mês de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.

Na Figura 3.13, observa-se que o comportamento do vento, na estação do Sumaré no mês de junho a agosto de 2003 e 2004, não há predominância na direção. Possuindo maior frequência de registros de ventos de intensidade entre 0,5 e 2,1 m/s, próximos de 60% dos registros. Na Figura 3.14, observa-se na estação do Horto que para o mesmo período, 71% dos registros são de intensidade de vento nula (calmaria) e 29% de ventos com intensidade entre 0,5 e 2,1 m/s. Possuindo maior frequência de registros de eventos provenientes da direção NW, cerca de 40% de registros.

Os resultados da análise do comportamento do vento nas estações Sumaré e Horto nos meses de junho, julho e agosto são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Estatística do comportamento do vento nas estações Sumaré e Horto para os meses de junho, julho e agosto de 2003 e 2004.

PCDs	Direção	Intensidade
Horto	NW = 40 %	Calmaria = 71% 0,5 – 2,1 = 29% 2,1 – 3,6 = 0,2%
Sumaré	E = 19% SE = 14% SW = 12% W = 21% NW = 12%	Calmaria = 19% 0,5 – 2,1 = 60% 2,1 – 3,6 = 14% 3,6 – 5,7 = 6,4 5,7 – 8,8 = 0,7

Nos demais meses não analisados aqui, observa-se no Horto a predominância de ventos com intensidade nula, cerca de 80% dos registros. Em particular, na estação do Sumaré, a intensidade do vento predominante é de 0,5 a 2,1m/s, com cerca de 56% dos registros. Quanto à direção dos ventos, não se observa nenhuma predominância, como também pode se verificado para os meses analisados na Tabela 3.3.

3.6.2 – Análise de Sensibilidade do FARSITE

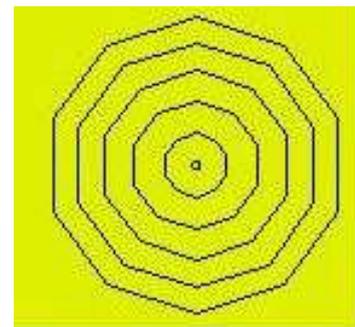
A análise de sensibilidade do FARSITE é importante para avaliar a forma e o perímetro do incêndio e o quão preciso irá se comportar na aplicação das mesmas nas mais diversas condições atmosféricas e ambientais. Visando a avaliação do comportamento da frente de fogo, utilizam-se os resultados experimentais presentes na literatura (RICHARD, 1990-1995). Para tal, consideram-se as seguintes premissas:

- no terreno plano com vegetação (gramínea) uniforme a linha de fogo deve ter uma taxa de propagação na direção normal a sua superfície;
- no terreno plano com vegetação (gramínea) uniforme em condições sem vento, ou seja, em condições isotrópicas, assume-se que sob estas condições e o fogo iniciando-se em um único ponto, a propagação avança de modo circular e a sua velocidade de avanço é constante;
- sob as mesmas condições, mas com vento constante, espera-se que o avanço da frente de fogo ocorra na forma de uma elipse.

A partir destas premissas, são realizadas simulações (Figuras 3.15 a 3.17) em um terreno plano com dois tipos de vegetação gramínea e floresta em condições uniformes, variando a intensidade e a direção do vento. A utilização destes combustíveis tem como objetivo analisar o efeito desta variável no avanço da frente de fogo, devido a diferente combustibilidade que eles possuem.



(a)

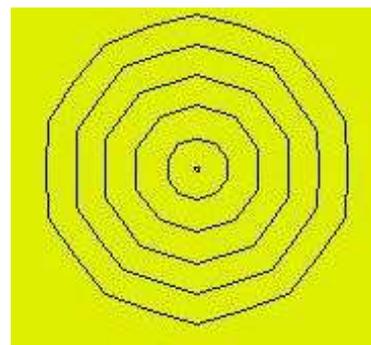


(b)

Figura 3.15: (a) Fogo de 6 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação com vento de 3 m/s com predominância da direção oeste e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação de calma e sem declive.

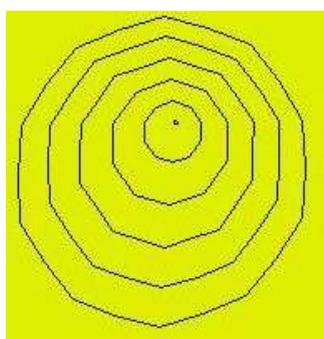


(a)



(b)

Figura 3.16: (a) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (gramíneas) em uma situação com vento de 3 m/s com predominância da direção oeste e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia) em uma situação sem vento e sem declive.



(a)



(b)

Figura 3.17: (a) Fogo de 4 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia) em uma situação com vento de 5m/s com predominância do vento Norte e sem declive. (b) Fogo de 5 horas de propagação sobre o combustível (Floresta Secundária Tardia.) em uma situação com vento de 5 m/s com predominância da direção sul e sem declive.

Nas condições onde não há vento e o declive é nulo, o incêndio tende a expandir-se na forma aproximada de um círculo, como pode ser observado nas Figuras 3.15 (b) e 3.15 (b). Estes resultados mostram que a forma do perímetro está relacionada com as condições de combustível, vento e declividade do terreno, podendo em situações de equilíbrio assumir formas de elipses (RICHARD, 1990).

Nas Figuras 3.15(a), 3.16 (a) e 3.17 (a) - (b), são apresentados os resultados das simulações onde é testado o comportamento do avanço do fogo em condições diferentes de intensidade e direção do vento. Observa-se que o comportamento do avanço da frente de fogo é coerente com a direção do vento e de acordo com os resultados obtidos na literatura (RICHARD, 1990).

3.6.3 – Ajuste do FARSITE com Resultado Experimental

Com propósito de ajustar o FARSITE, visando a criação de cenários para o Parque Nacional da Tijuca, utiliza-se dados obtidos a partir do experimento conduzido na República Africana (MOULA, 1996). O experimento foi realizado sob as seguintes condições: vegetação de savana arbustiva, relevo plano e ventos variando de 0 a 2,8 m/s.

Tendo em vista o exposto e o ajuste do FARSITE, realizou-se uma simulação numérica considerando as condições semelhantes ao do experimento acima mencionado: vegetação arbustiva (modelo 5 - FARSITE), baixa umidade de combustível, relevo plano, vento variando de 0 a 2,8 m/s e fator de ajuste igual 0,1.

Na Figura 3.18, são apresentados os resultados da velocidade de propagação da frente de fogo do experimento e da simulação via FARSITE, considerando a variação da intensidade do vento entre 0 – 3,0 m/s.

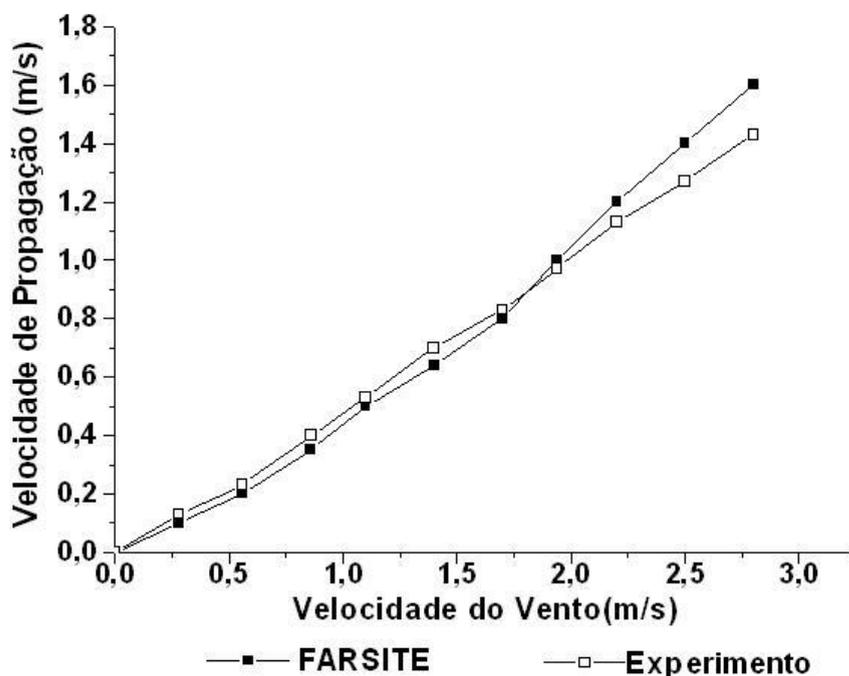


Figura 3.18: Velocidade de propagação obtida entre o experimento realizado por MOULA (1996) e a simulação no FARSITE sob vegetação de savana tipo arbustiva.

Considerando o ajuste de 0,1 para o FARSITE, realizou-se uma simulação da velocidade de propagação do fogo assumindo as condições explicitadas no experimento com cobertura vegetal de gramínea. Na Figura 3.19, é observado que a cobertura de gramínea, como era esperado, possui a velocidade de propagação cerca de 29% superior à obtida na savana arbustiva. Em suma, conclui-se que a velocidade de propagação está relacionada ao tipo de combustível.

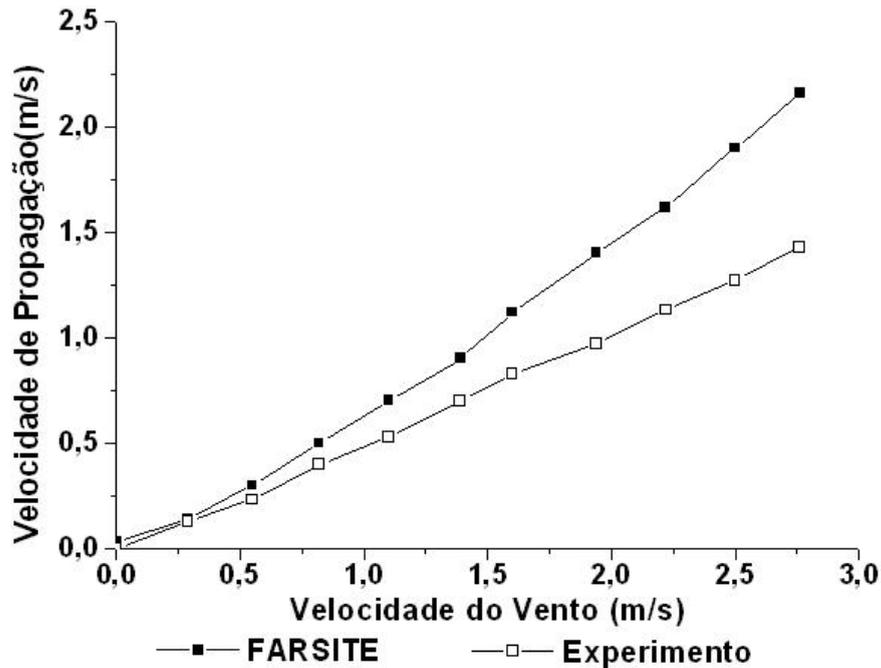


Figura 3.19: Velocidade de propagação obtida entre o experimento e a simulação sob vegetação de savana e gramínea.

Na Tabela 3.4, são apresentados valores da eficiência de combustão em diferentes componentes da vegetação. Este parâmetro refere-se à quantidade de combustível queimado. Portanto, pode-se observar quanto mais lenhoso o material, menor é a eficiência de combustão; quanto mais herbáceo, maior é este valor.

Tabela 3.4: Biomassa acima do nível do solo (kg/m^2) e eficiência de combustão.

Campo de Cerrado			Cerrado Sensu Strito	
Componente	massa	Efic. combustão	Massa	Efic. combustão
Gramíneas	0,35	99%	0,27	99%
Brotos plantas	0,24	49%	0,17	71%
Folhas arbustos	<,01	84%	<,01	34%
Peq. Troncos	0,13	26%	0,18	40%
ToTal	0,86	72%	1,00	84%

Fonte: WARD *et al.* 1992.

3.6.4 – Cenários de Frente de Fogo na Floresta da Tijuca

Com propósito de estabelecer os cenários de frente de fogo para Floresta da Tijuca consideram-se as seguintes premissas:

- a) Assume-se o período crítico de maior susceptibilidade de incêndios (alto e extremo) nos meses de junho, julho e agosto (conforme o Capítulo 2);
- b) Assume-se a variação real da intensidade e direção do vento baseados nos resultados da análise realizada na seção 3.6.1, a partir dos dados meteorológicos obtidos das plataformas de coleta de dados localizadas nos setores do Horto e Sumaré;
- c) Assume-se o ajuste do FARSITE realizado na seção 3.6.3;
- d) Assumem-se as áreas com cobertura vegetal dos tipos gramínea e floresta para os setores Horto e Sumaré.

Os cenários foram gerados sobre um mapa-síntese, este mapa é o resultado da integração de cinco planos de informação (elevação, declividade, orientação do terreno, modelo de combustível e cobertura vegetal, conforme apresentado na Figura 3.5) que representa, em cada ponto, todos os fatores integrados. Além dessas informações, são

associados outros parâmetros como umidade do combustível, fator de ajuste e dados meteorológicos (PCD's).

Na Figura 3.20, é mostrada a localização das plataformas de coleta de dados (PCD's) nos setores Sumaré e Horto. Em cada setor, foram atribuídos dois pontos de focos de ignição, representados por uma cruz na Figura 3.20, para cobertura vegetal de gramínea e de floresta, respectivamente, para a realização das simulações (Figuras 3.21 a 3.22). Nessa Figura, é apresentada a área de estudo e a classificação do tipo de combustível utilizado para representar as classes de vegetação e de uso do solo.

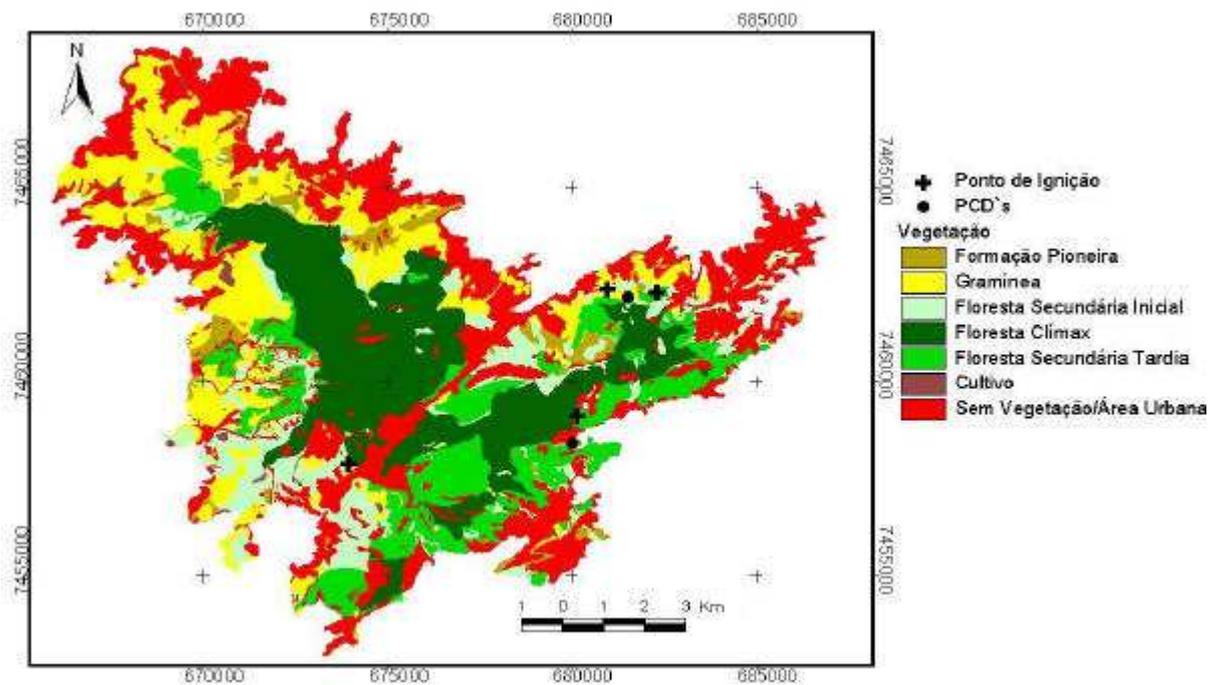


Figura 3.20: Mapa de classificação da cobertura vegetal para o FARSITE.

Com base nas premissas estabelecidas anteriormente, são construídos os cenários para a realização das simulações do avanço do fogo na cobertura vegetal de gramínea e de floresta nos setores Sumaré e Horto. Assim, os pontos de ignição, mostrados na Figura 3.20, foram selecionados para as simulações (Figura 3.21 e 3.22). Estes cenários são mostrados nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5: Cenários da evolução do *IRF*, vento, taxa de propagação e intensidade do fogo durante a simulação da frente de fogo na cobertura de vegetação de gramínea nos setores do Sumaré e Horto.

Setor	Hora	Índice de Risco (%)	Vento		Taxa de Propagação (m/min)	Intensidade da linha do Fogo (kw/m)
			intensidade (m/s)	direção (°)		
Sumaré	12:00	25,9	4	315	0,33	131
Gramínea	13:00	26,1	2	16	3,86	3100
	14:00	25,6	2	37	7,4	6068
	15:00	36,7	5	26	10,9	9037
Horto	12:00	5,7	0	336	0,5	195
Gramínea	13:00	5,8	1	187	4,6	4053
	14:00	5,8	0	3	8,7	7910
	15:00	5,8	0	182	12,8	11768

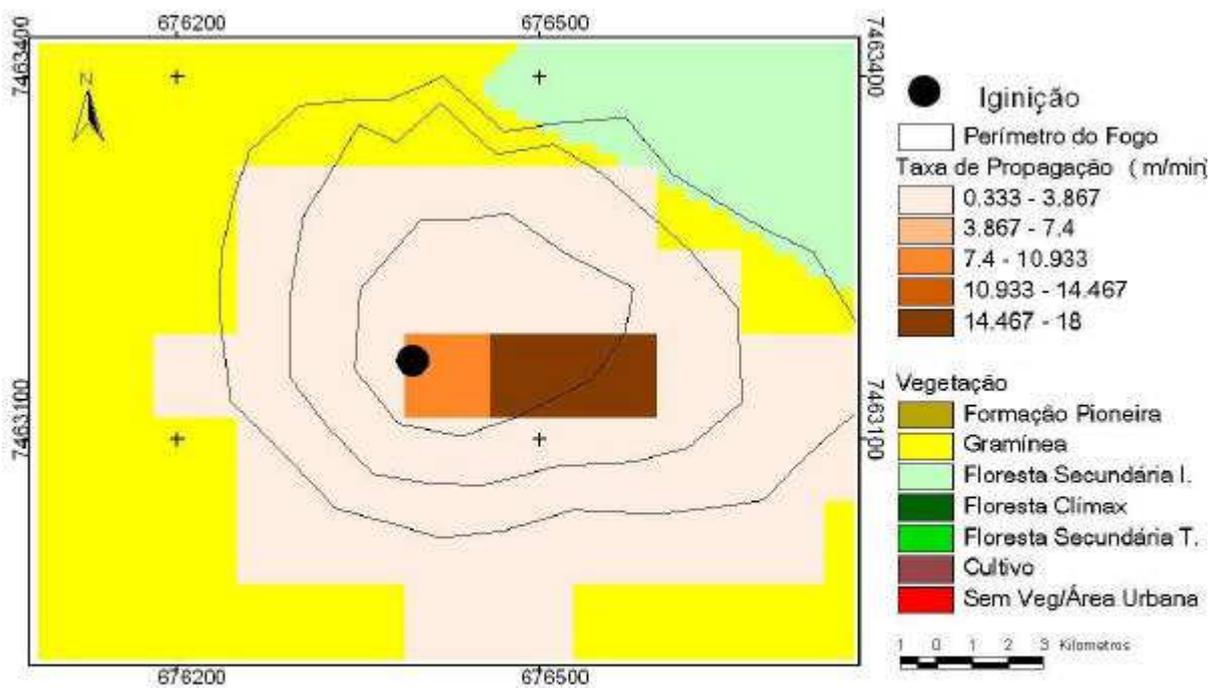
Tabela 3.6: Cenários da evolução do *IRF*, vento, taxa de propagação e intensidade do fogo durante a simulação da frente de fogo na cobertura de vegetação de floresta nos setores do Sumaré e Horto.

Setor	Hora	Índice de Risco (%)	Vento		Taxa de Propagação (m/min)	Intensidade da linha do Fogo (kw/m)
			intensidade (m/s)	direção (°)		
Sumaré	12:00	25,9	4	315	0	76
Floresta	13:00	26,1	2	16	0,6	176
	14:00	25,6	2	37	1,2	281
	15:00	36,7	5	26	1,8	383
Horto	12:00	5,7	0	336	-	-
Floresta	13:00	5,8	1	187	-	-
	14:00	5,8	0	3	-	-
	15:00	5,8	0	182	-	-

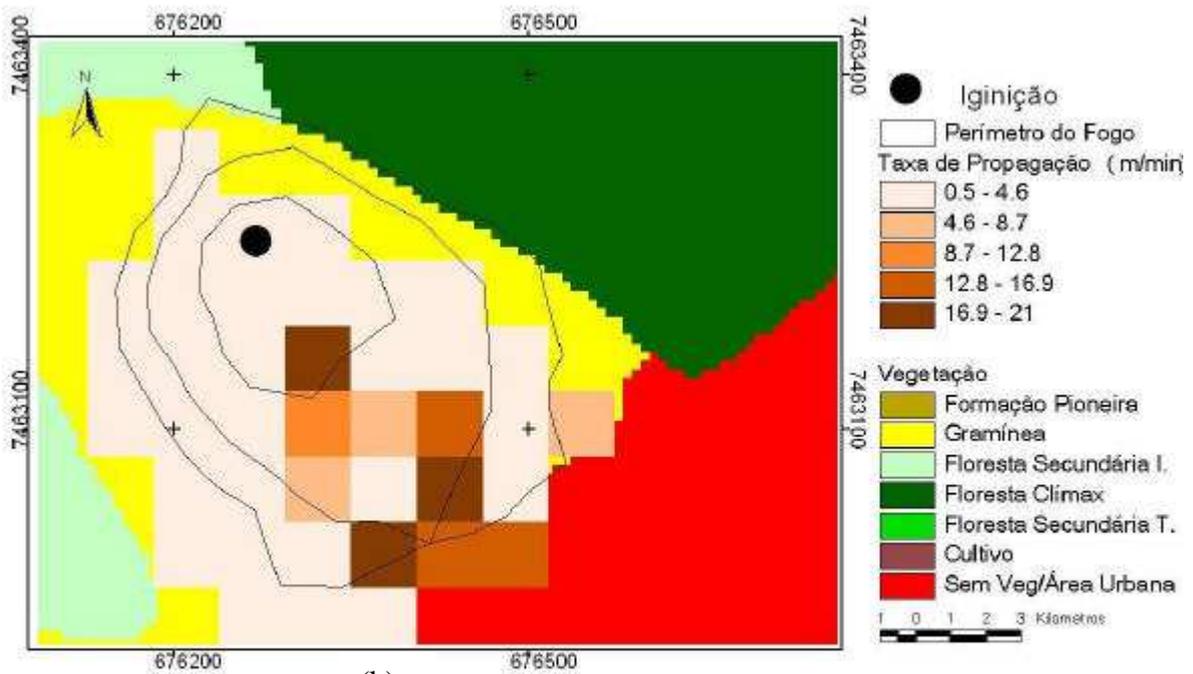
Na Tabela 3.5, observa-se que o incêndio na vegetação de gramínea tem um aumento significativo de sua intensidade a cada passo de tempo e um incremento na taxa de propagação, tanto no setor do Sumaré quanto no Horto. No Sumaré, a área queimada na vegetação de gramínea no período de 3:00 horas correspondeu aproximadamente a 16.000 m². No Horto, no mesmo período e também sobre gramínea,

a área queimada foi próxima à alcançada no setor do Sumaré, cerca de 14.000 m². Na Figura 3.21, são observados os valores da taxa de propagação e o perímetro formado pelo avanço da frente de fogo nos dois setores. Embora o índice de risco no Horto fosse baixo, o comportamento das duas áreas foi semelhante sobre a cobertura de gramínea. Percebe-se, então, que os comportamentos do avanço do fogo em ambas as localidades são similares, conforme Tabela 3.5, uma vez que esse tipo de vegetação na presença de fogo acelera a perda de umidade.

Na Tabela 3.6, nota-se que na vegetação de floresta no Horto não houve propagação do fogo e no setor do Sumaré os valores da taxa de propagação e da intensidade do fogo foram baixos (Figura 3.22), apesar de apresentar índices de risco alto. A área queimada no Sumaré no período de 3:00 horas correspondeu aproximadamente 1.000 m². Os resultados obtidos nas simulações (Figuras 3.21 e 3.22) mostraram a importância do material combustível no avanço da frente de fogo.

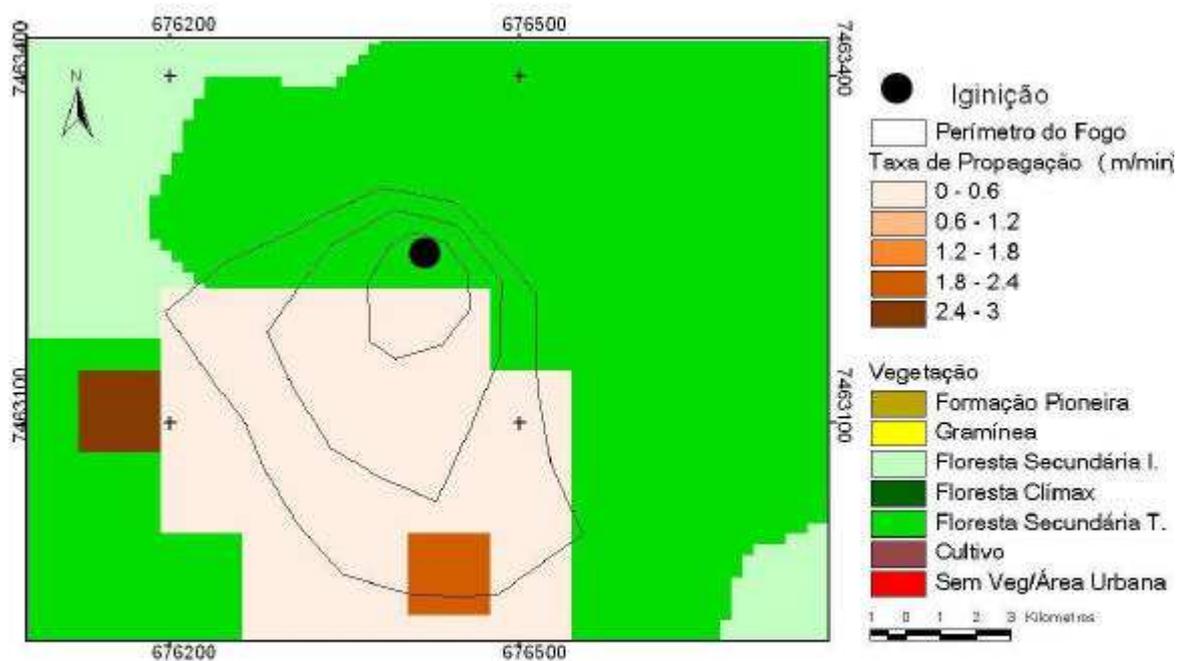


(a)



(b)

Figura 3.21: (a) Taxa de propagação e perímetro do fogo obtido a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de gramínea no setor do Sumaré; (b) Taxa de propagação e perímetro fogo obtido a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de gramínea no setor do Horto.



(a)

Figura 3.22: (a) Taxa de propagação e perímetro do fogo obtidos a partir do ponto de ignição sobre a cobertura vegetal de Floresta no setor do Sumaré; (b) Não há propagação sobre a cobertura vegetal de Floresta no setor do Horto.

Com esses resultados, observa-se que o índice de risco (*IRF*) representa as condições locais da área. Uma vez calculado o índice, a partir de dados obtidos de um ecossistema de floresta, ele não será um bom indicador da susceptibilidade a incêndio em um ambiente com cobertura de gramínea, mesmo que área seja próxima aos dados obtidos pelas PCD's. Este comportamento é verificado na Figura 2.6 da seção 2.5.1 do Capítulo 2. Nesta Figura, observa-se uma pequena variação diurna do índice no setor do Horto, enquanto no Sumaré a variação diurna é 50% maior em alguns períodos. Além disso, no Horto, observa-se uma inércia na resposta do índice diferente da resposta na área do Sumaré que é imediata, conforme discutido, na seção 2.5.3, no Capítulo 2.

Para exemplificar a influência da vegetação no avanço do incêndio na Tabela 3.7, é apresentado os valores de taxa de propagação (*R*) e o comprimento da chama (*CC*) em diferentes tipos de material combustível.

Tabela 3.7: Parâmetros do fogo calculados pelo FARSITE.

Modelo de Combustível	Tipologia Vegetal	Combustível do modelo	<i>R</i> (m/min)	<i>CC</i> (m)
2	Formação Pioneira	Floresta (gramíneas e subbosque)	1.5	0.7
3	Gramíneas	Gramíneas (2,5ft)	18	15.5
5	Cultivo	Brush (2ft)	1.0	1.7
6	Floresta Secundária I.	Dormant Brush Hardwood Slash	1.5	0.7
8	Floresta Clímax	Litter e Floresta Fechada	0.3	0.5
10	Floresta Secundária T.	Floresta (litter e subbosque)	0.5	1.7

Uma outra abordagem foi à realização das simulações para avaliar a influência do vento sobre o avanço do fogo nas áreas do Sumaré e do Horto, como apresentado nas Figuras 3.23 a 3.32.

As simulações geradas com a intensidade do vento de calmaria (>0,5) sobre uma formação de gramínea estima-se que o fogo queime em uma taxa de propagação média de 1,8 m/min para o setor do Sumaré e 3,6 m/min para o setor do Horto (Tabela 3.8 e 3.9). A taxa de propagação mais alta registradas foi de 9 m/min no Sumaré e 18 m/min no Horto (Figura 3.23 e 3.26). A intensidade da linha de fogo média foi de 800 kw/m no

Sumaré e 1273 kw/m no setor do Horto. Nestas simulações, estimou-se que a área total queimada foi de 2,5 ha no setor do Sumaré e 2,6ha no setor do Horto (Tabela 3.8 e 3.9).

Nas simulações realizadas com intensidade do vento 2,5 m/s na cobertura de gramínea, observou-se a taxa de propagação média de 5,5 m/min e intensidade do fogo média de 2.433 kw/m nas condições do setor do Sumaré (Tabela 3.8). Nas simulações realizadas no setor do Horto, verificou-se a taxa de propagação média de 2,8 m/min e intensidade do fogo média de 1273 kw/m (Tabela 3.9). A maior taxa de propagação registrada no setor do Sumaré foi de 28m/min e 14 m/min no setor do Horto (Figura 3.24 e 3.27). Nestas simulações numéricas, a área queimada foi de 3,0 ha no Sumaré e 3,6 ha no Horto.

Na presença de ventos com intensidade de 5,5m/s na cobertura de gramínea, as simulações realizadas estimaram a taxa de propagação média de 5,3 m/min e intensidade do fogo média de 2132 na área do Sumaré e 4.6 m/min e 2102 na do Horto (Tabela 3.8 e 3.8). As taxas máximas observadas de propagação foram de 26 m/min no Sumaré e 23 m/min no Horto (Figura 3.25 e 3.28). A área queimada obtida nessas simulações, no Sumaré e no Horto, foram 4,9 ha e 4,0 ha, respectivamente.

Tabela 3.8: Setor Sumaré – Gramínea.

Intensidade do Vento (m/s)	Taxa de Propagação média (m/min)	Intensidade da linha do Fogo média (kw/m)	Área Queimada (ha)
calmaria (>0.5)	1.8	800	2.5
2.80	5.5	2433	3.8
5.5	5.3	2132	4.9

Tabela 3.9: Setor Horto – Gramínea.

Intensidade do Vento (m/s)	Taxa de Propagação média (m/min)	Intensidade da linha do Fogo média	Área Queimada (ha)
calmaria (>0.5)	3.6	1238	2.6
2.80	2.8	1273	3.6
5.5	4.6	2102	4.0

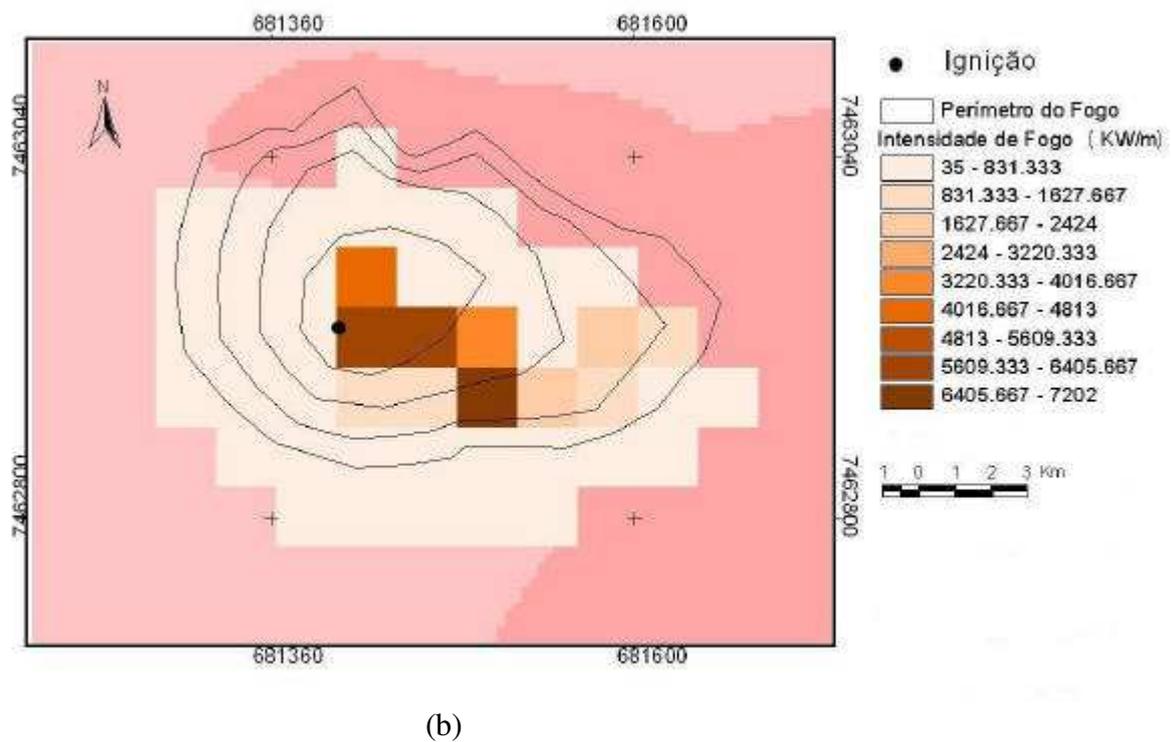
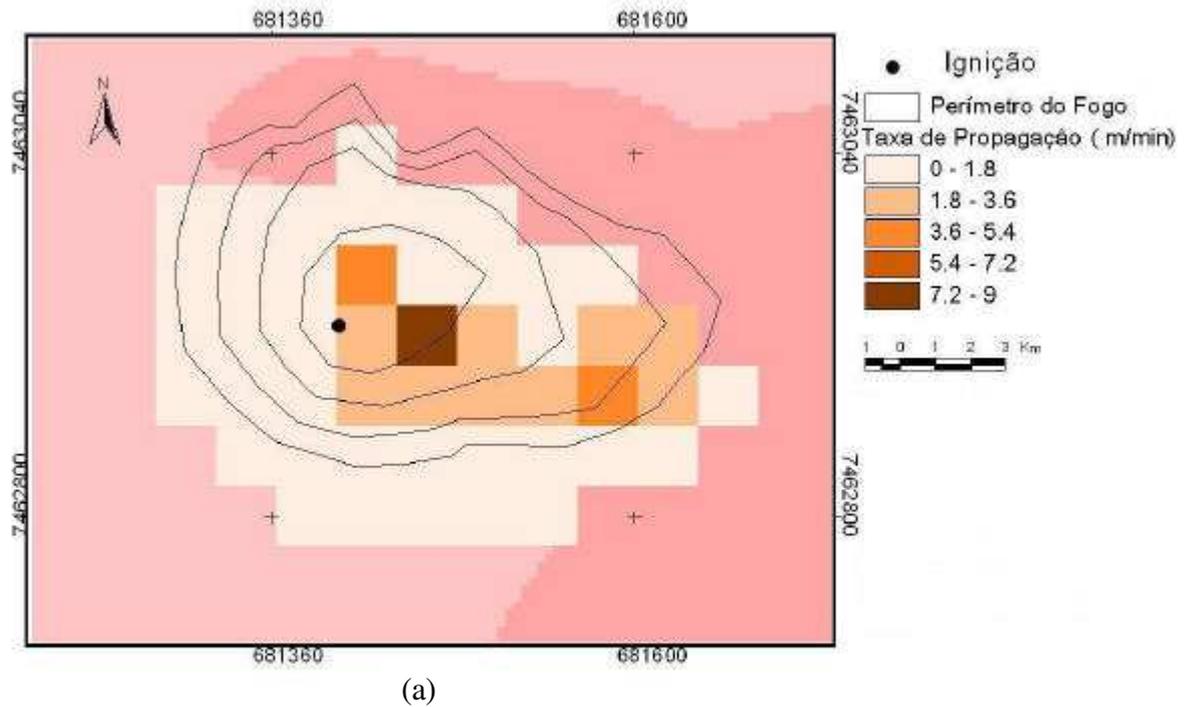
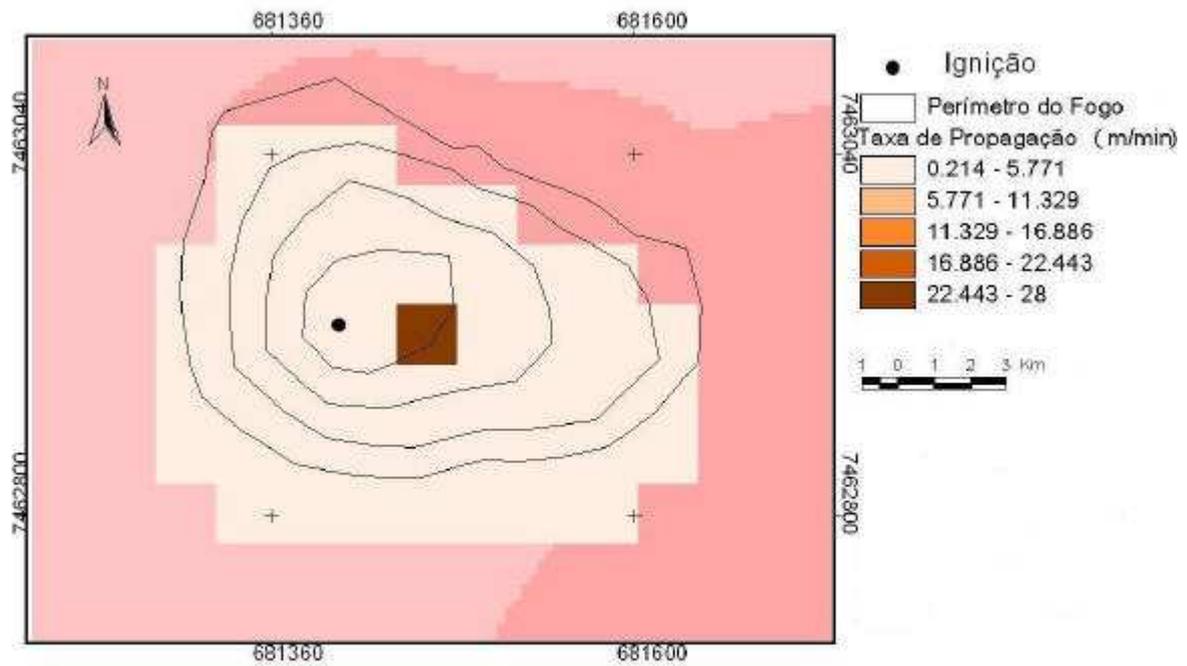
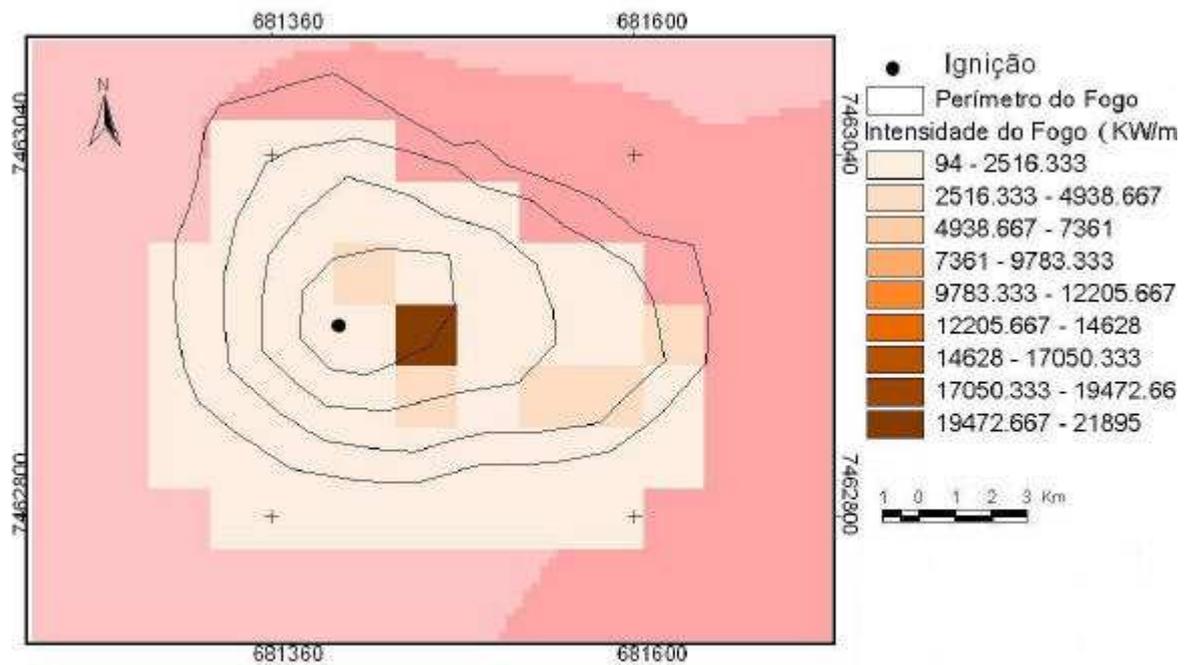


Figura 3.23: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 0.28m/s – Sumaré.

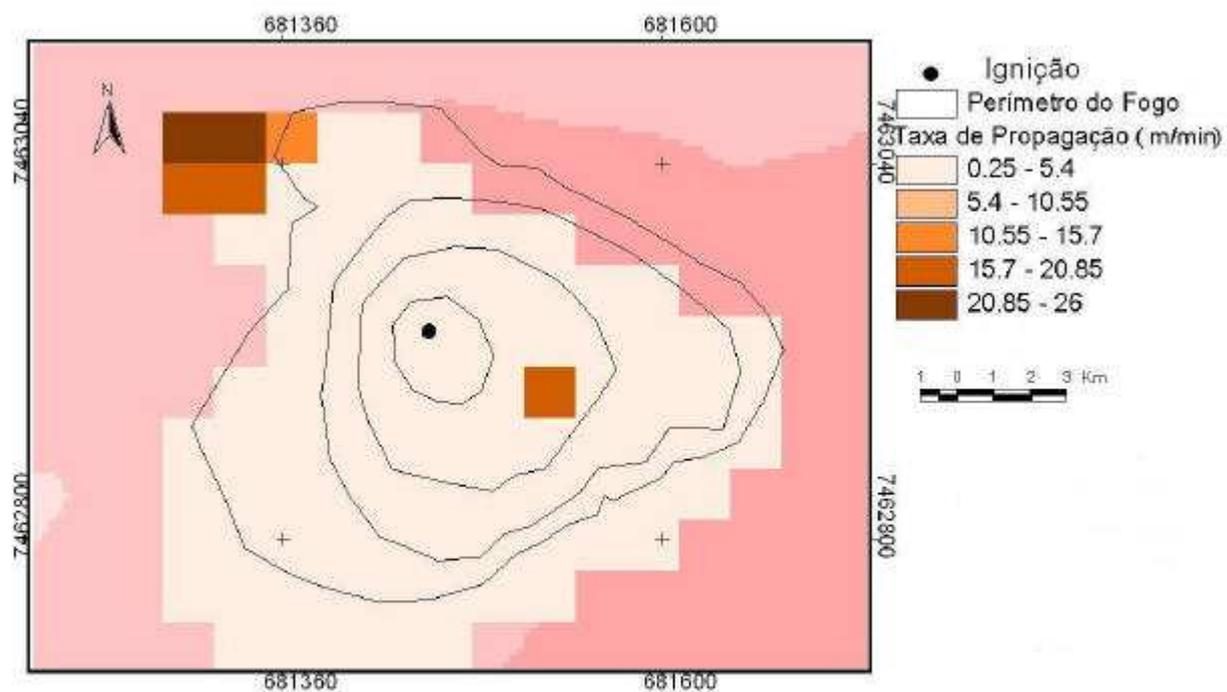


(a)

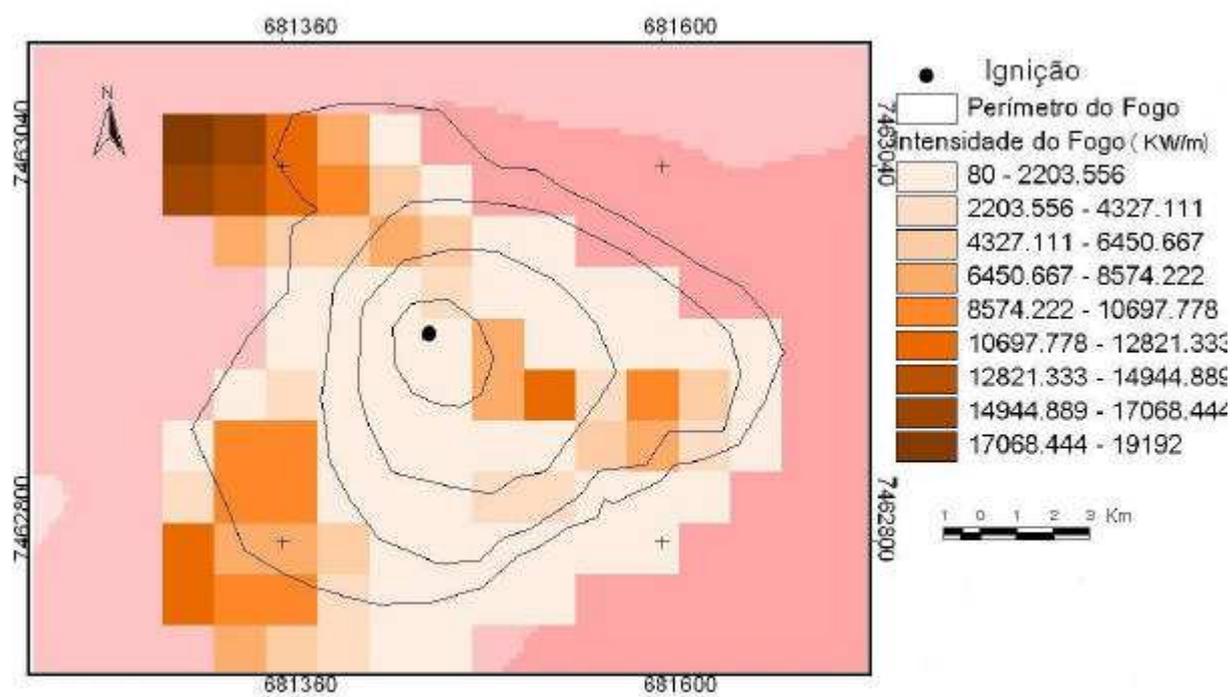


(b)

Figura 3.24: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 2.5 m/s – Sumaré.

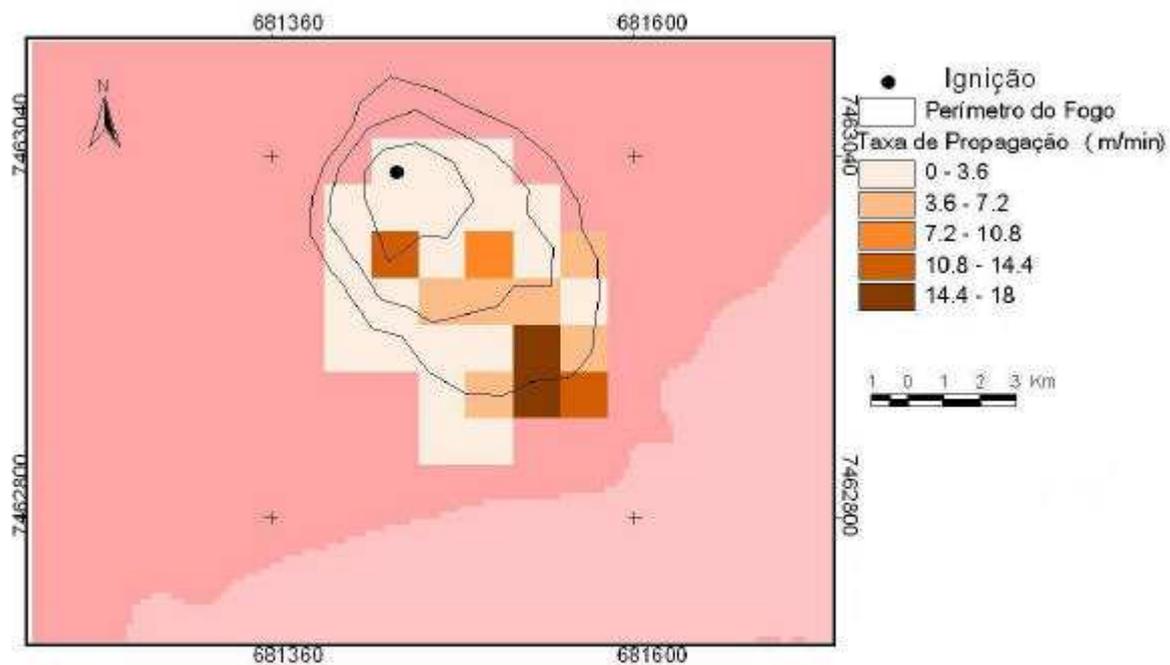


(a)

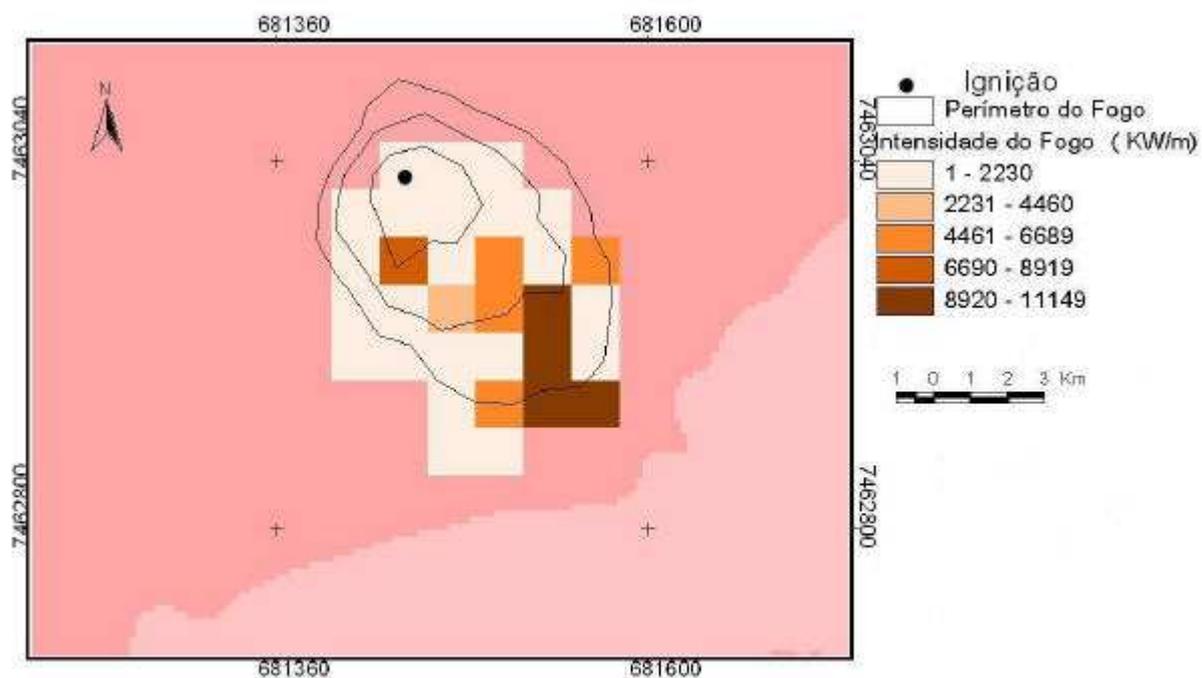


(b)

Figura 3.25: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 5.5 m/s – Sumaré.

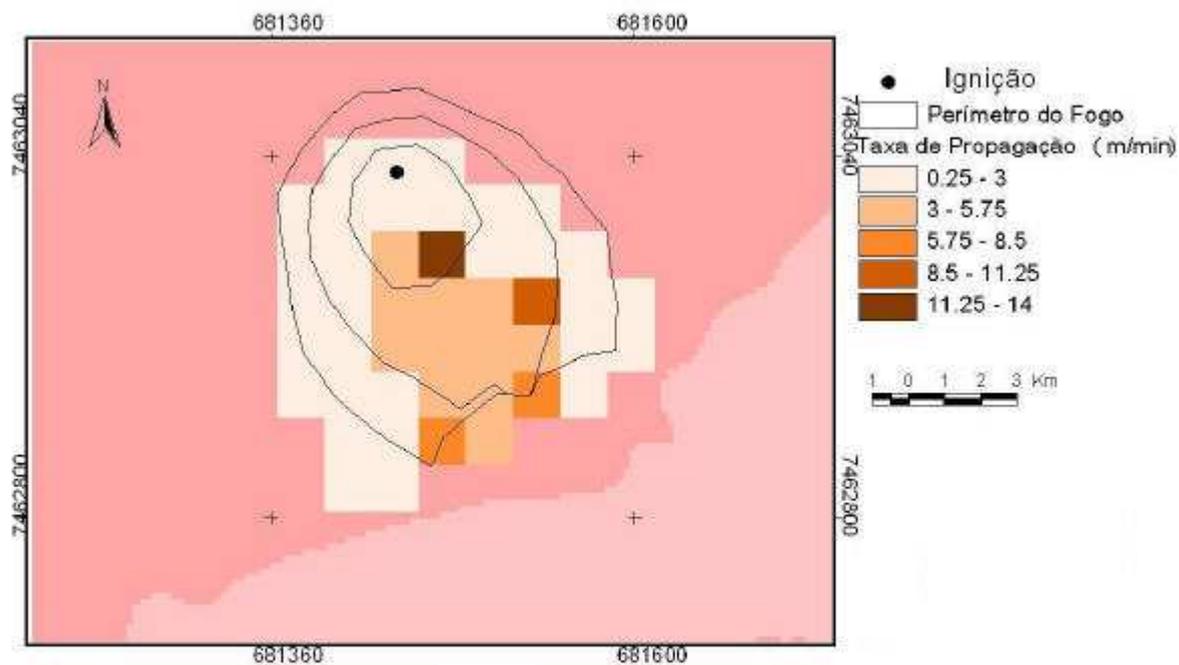


(a)

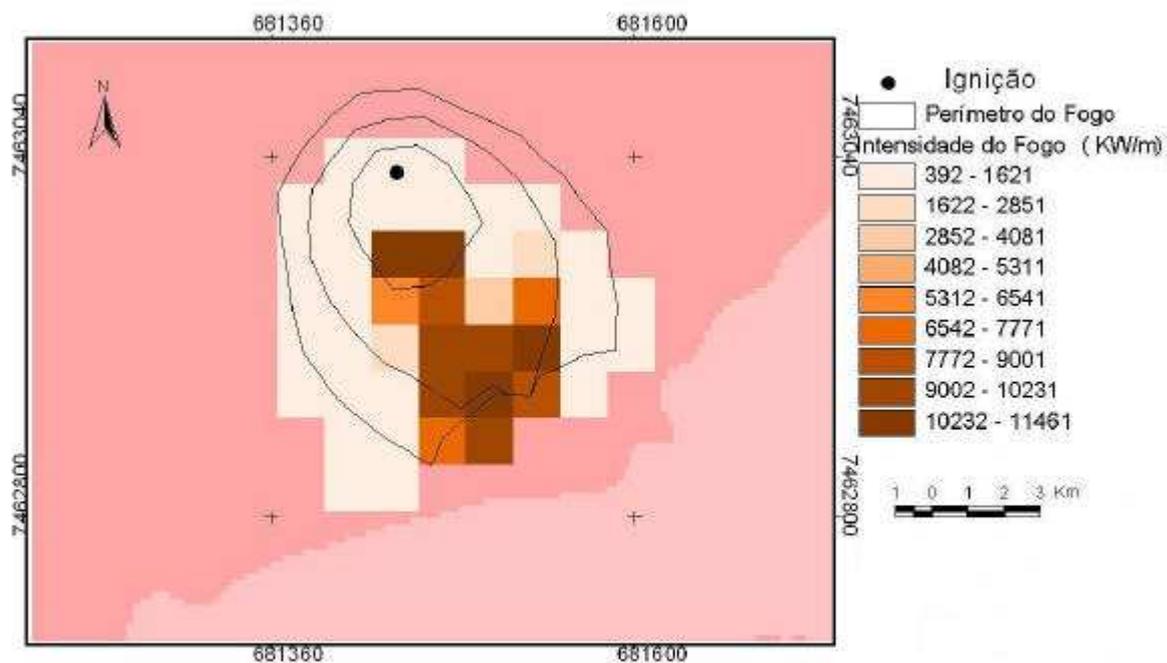


(b)

Figura 3.26: (a)-(b)Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 0.28 m/s – Horto.

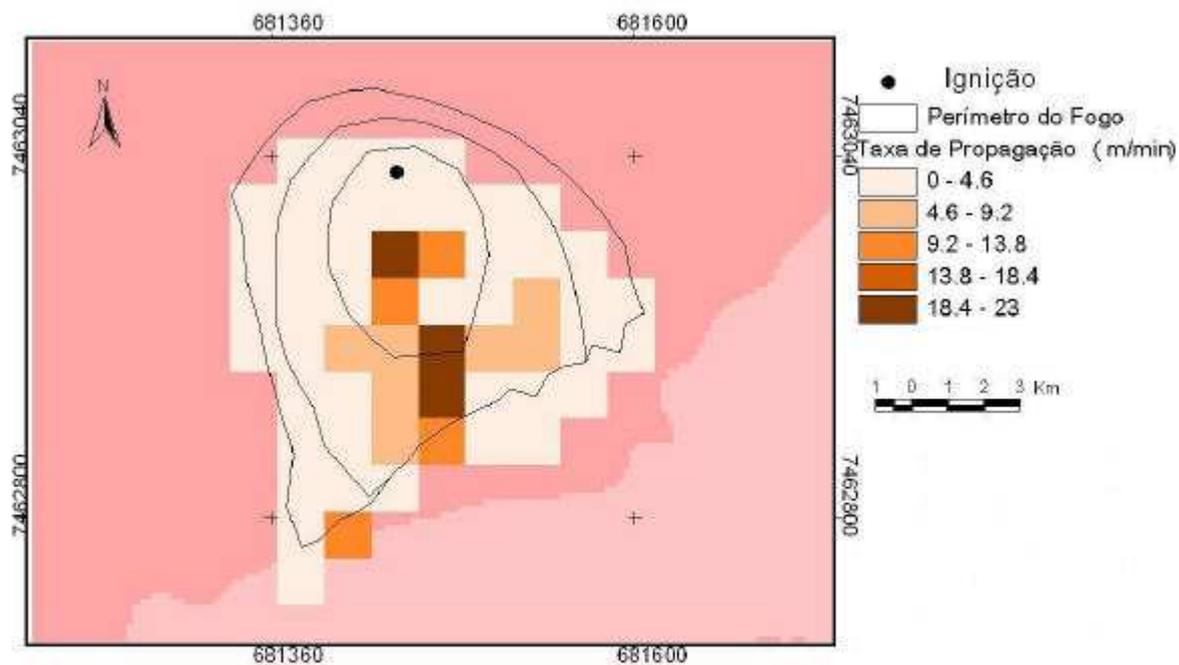


(a)

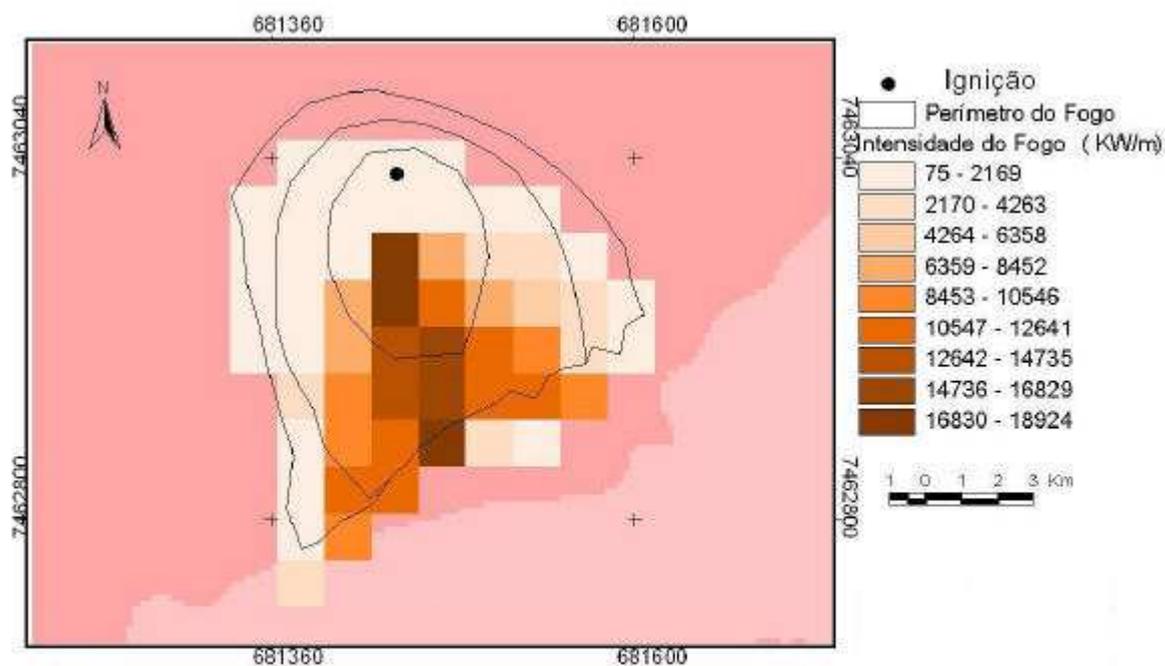


(b)

Figura 3.27: (a)-(b)Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 2.5 m/s – Horto.



(a)



(b)

Figura 3.28: (a)-(b)Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por gramínea com intensidade do vento de 5.5 m/s - Horto.

Com os resultados obtidos pode-se observar, comparando as simulações com formação de gramíneas nas condições consideradas no Sumaré e no Horto, que os valores apresentados de taxa de propagação, de intensidade do fogo e de área queimada foram próximos ao esperado.

Nas simulações realizadas na formação de floresta na área do Sumaré e do Horto, observou-se que não houve variação na taxa de propagação e na intensidade do fogo em função da velocidade do vento (Figuras 3.31 a 3.36). Nas simulações com cenário de floresta, observa-se que o perímetro formado não mudou com a variação do vento diferente do comportamento observado nas Figuras 3.23 a 3.25. Também não houve um aumento na taxa de propagação na área queimada. O valor médio da taxa de propagação no setor do Sumaré foi de 0,02 a 0,4 m/min e da intensidade do fogo foi de 75 a 80 kw/m (Tabela 3.10) (Figura 3.29 a 3.31). Este comportamento também foi verificado no setor do Horto, onde a taxa de propagação variou entre 0,1 a 0,05 m/min e a intensidade do fogo de 51 a 52 kw/m (Tabela 3.11) (Figura 3.32 a 3.34).

Tabela 3.10: Setor Sumaré – Floresta.

Intensidade do Vento (m/s)	Taxa de Propagação média (m/min)	Intensidade da linha do Fogo média (kw/m)	Área Queimada (ha)
calmaria (>0.5)	0.02	75	1.2
2.80	0.02	80	1.3
5.5	0.4	86	1.3

Tabela 3.11: Setor Horto – Floresta.

Intensidade do Vento (m/s)	Taxa de Propagação média (m/min)	Intensidade da linha do Fogo média (kw/m)	Área Queimada (ha)
calmaria (>0.5)	0.1	52	1.0
2.80	0.05	50	1.0
5.5	0.04	51	1.0

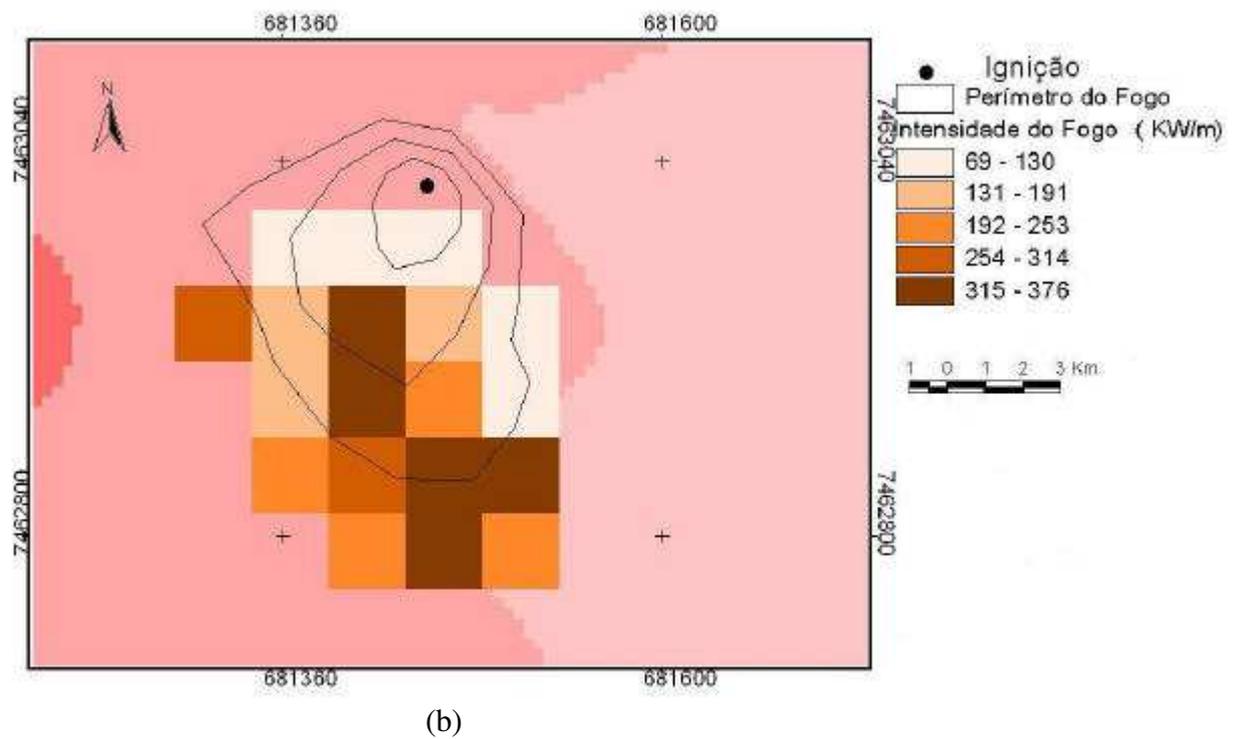
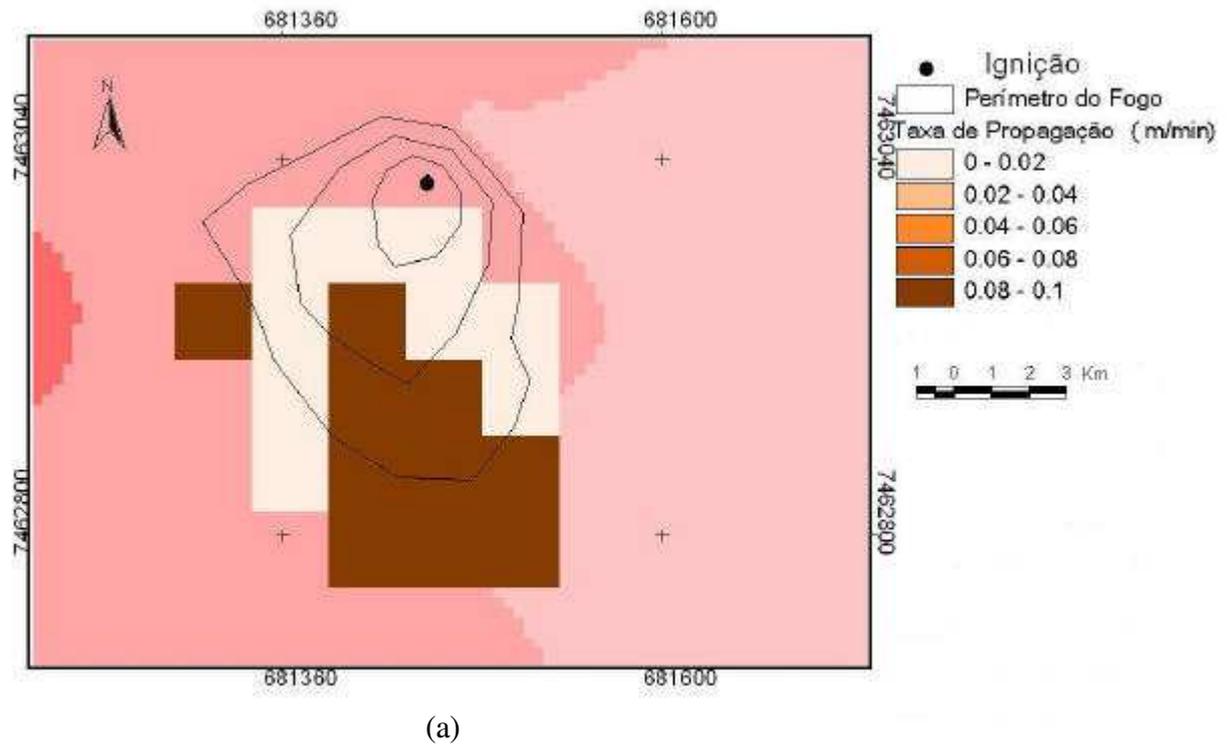
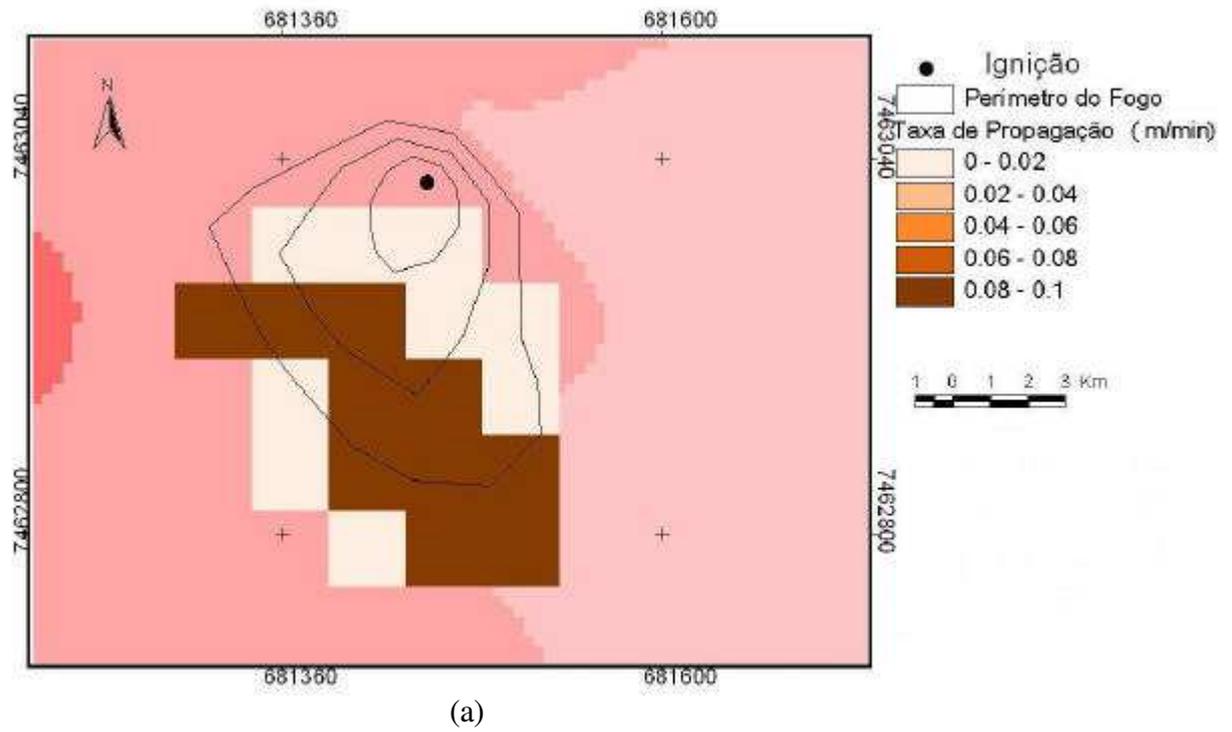
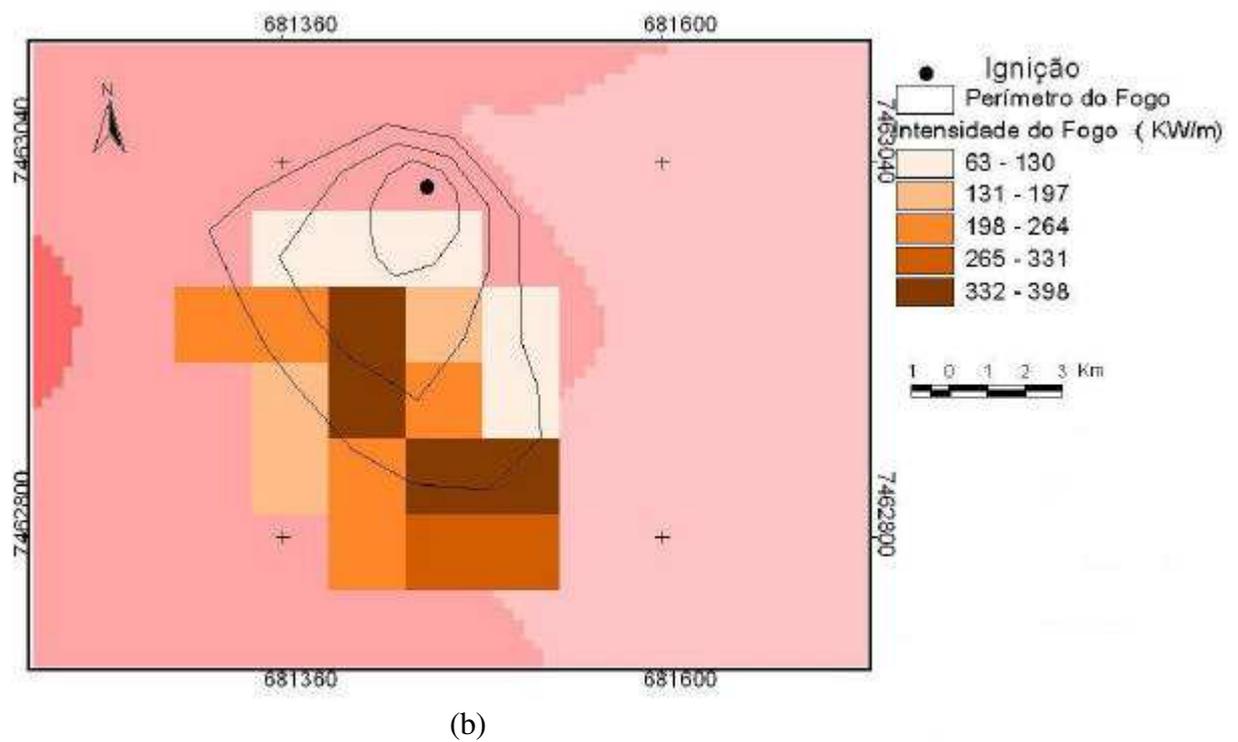


Figura 3.29: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 0.28 m/s – Sumaré.



(a)



(b)

Figura 3.30: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 2.5 m/s – Sumaré.

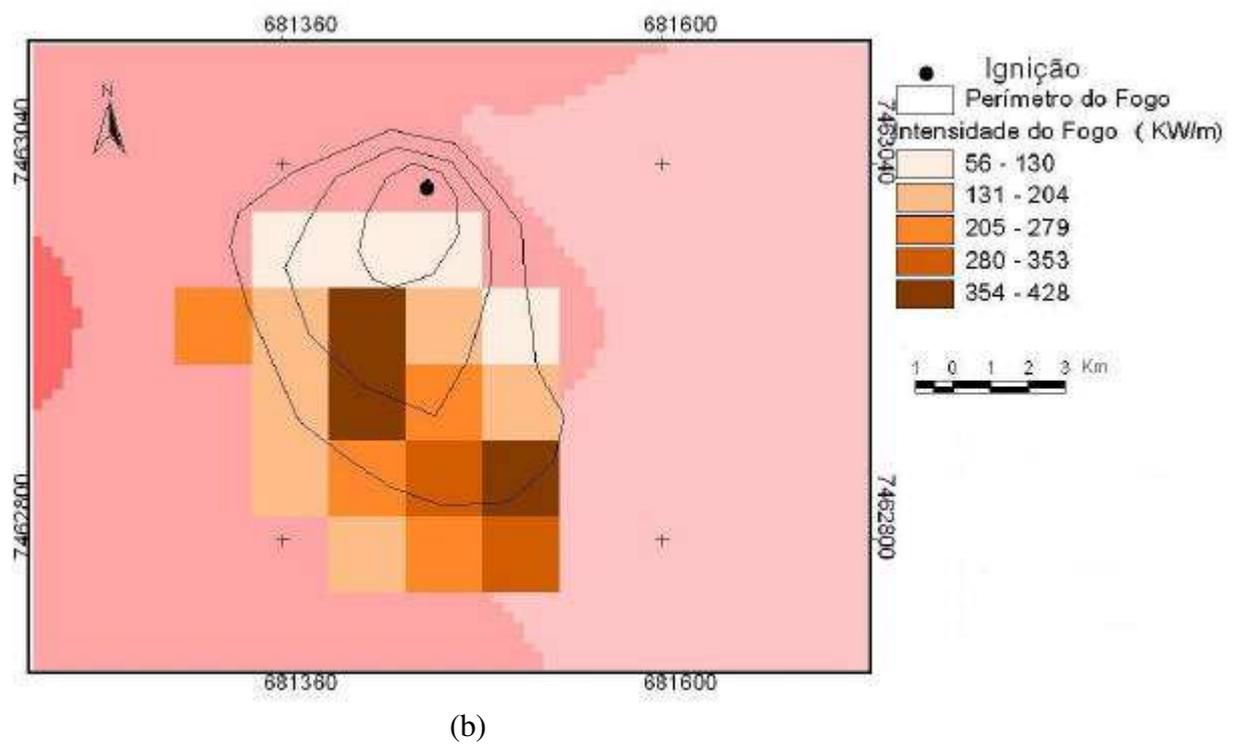
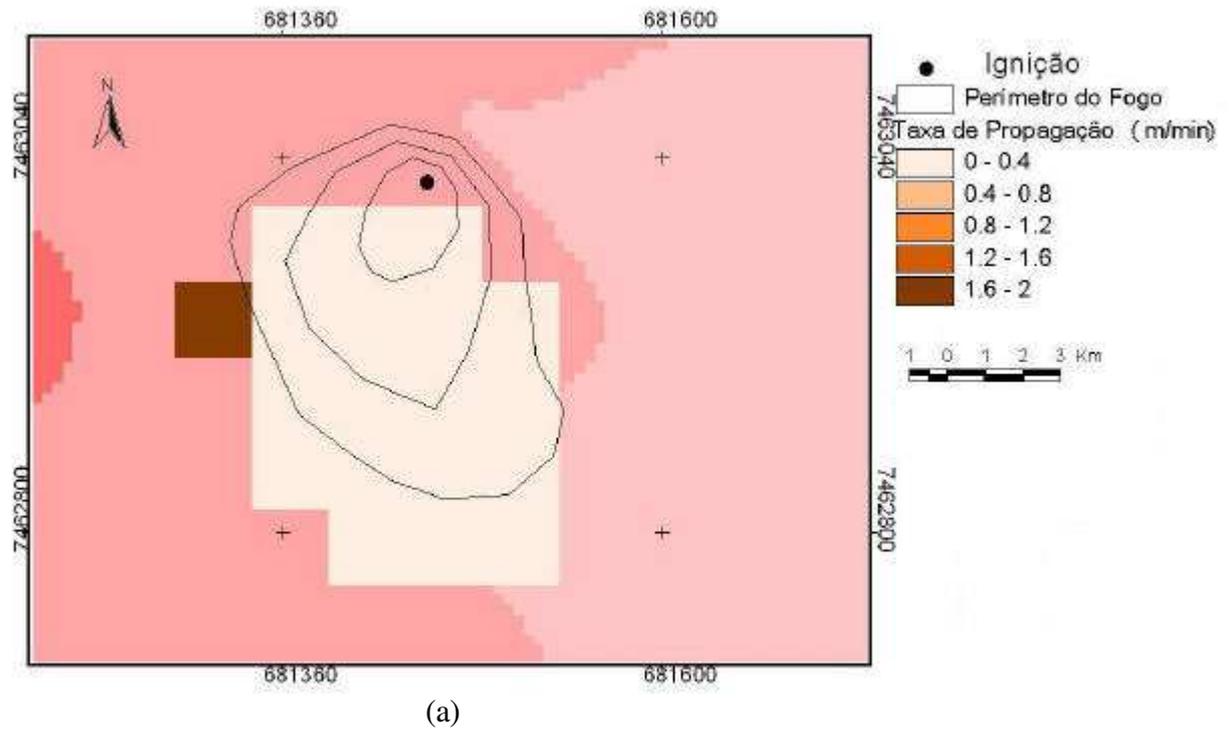
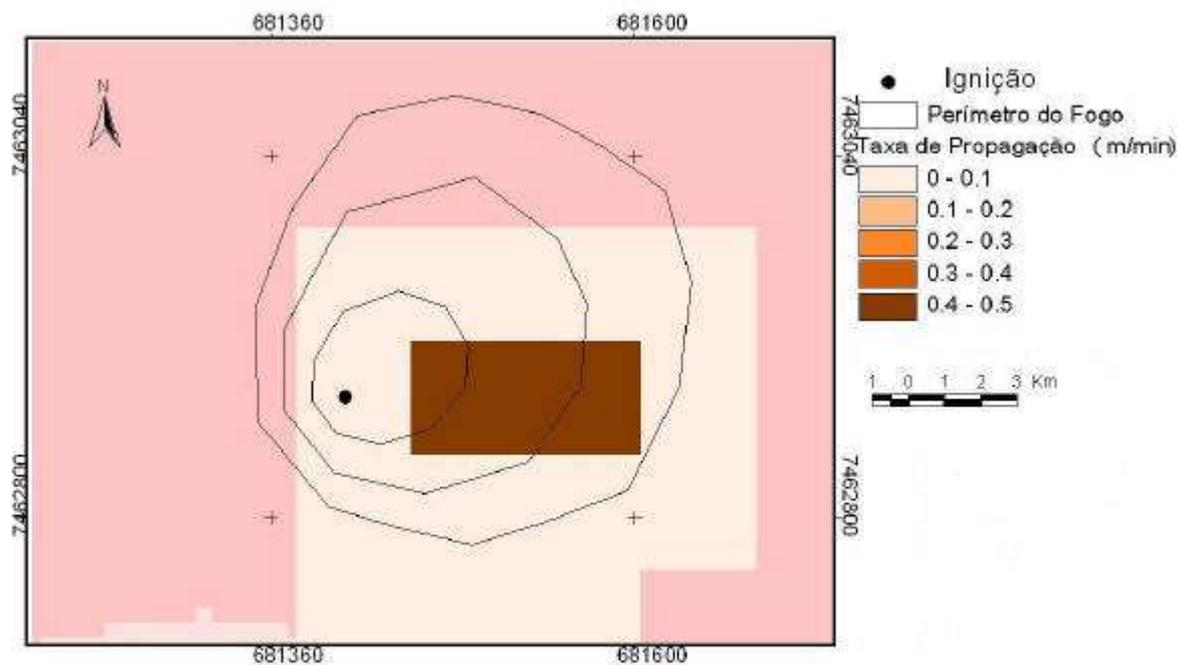
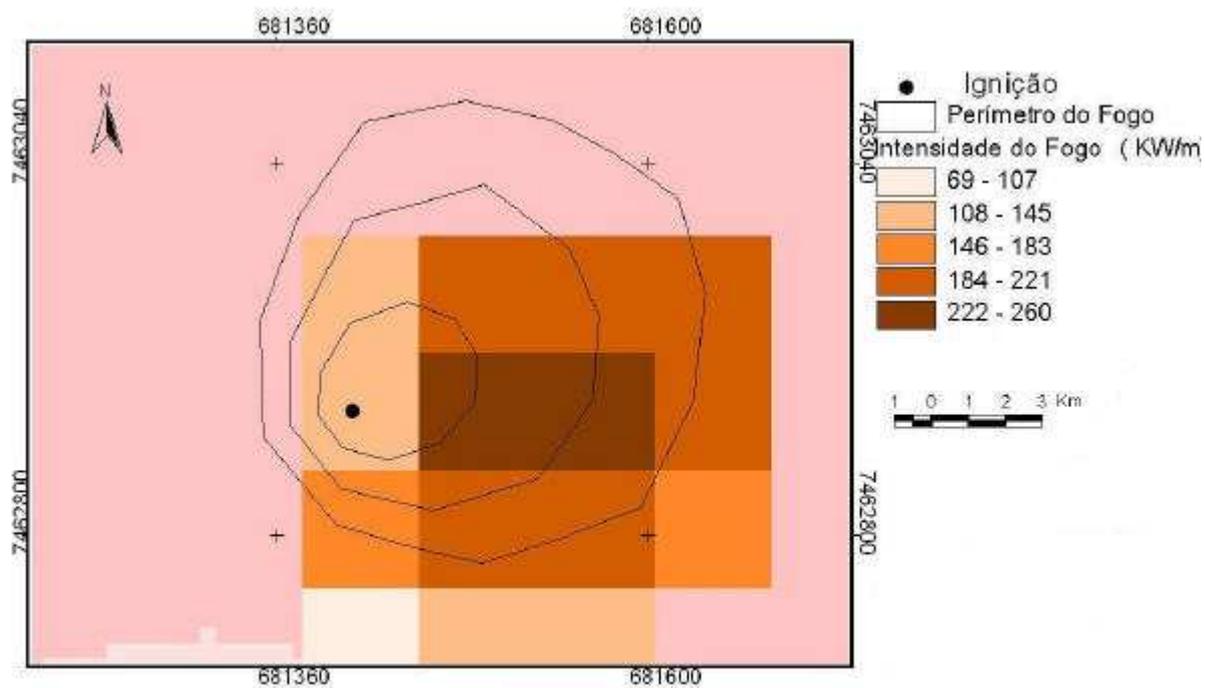


Figura 3.31: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 5.5 m/s – Sumaré.

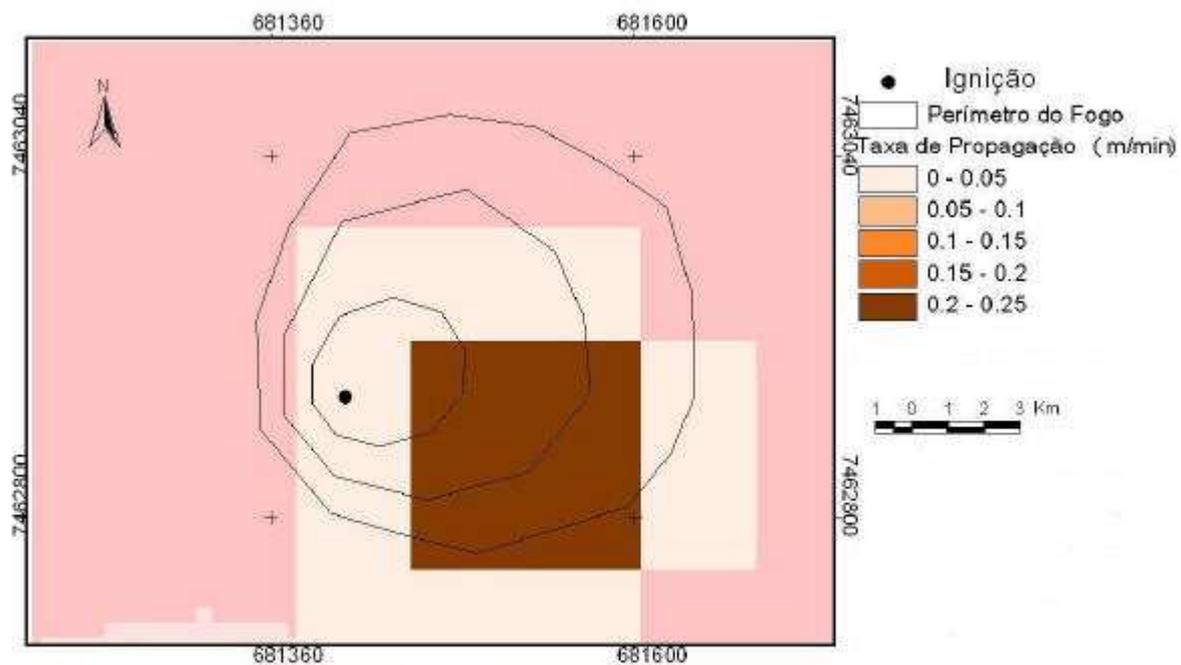


(a)

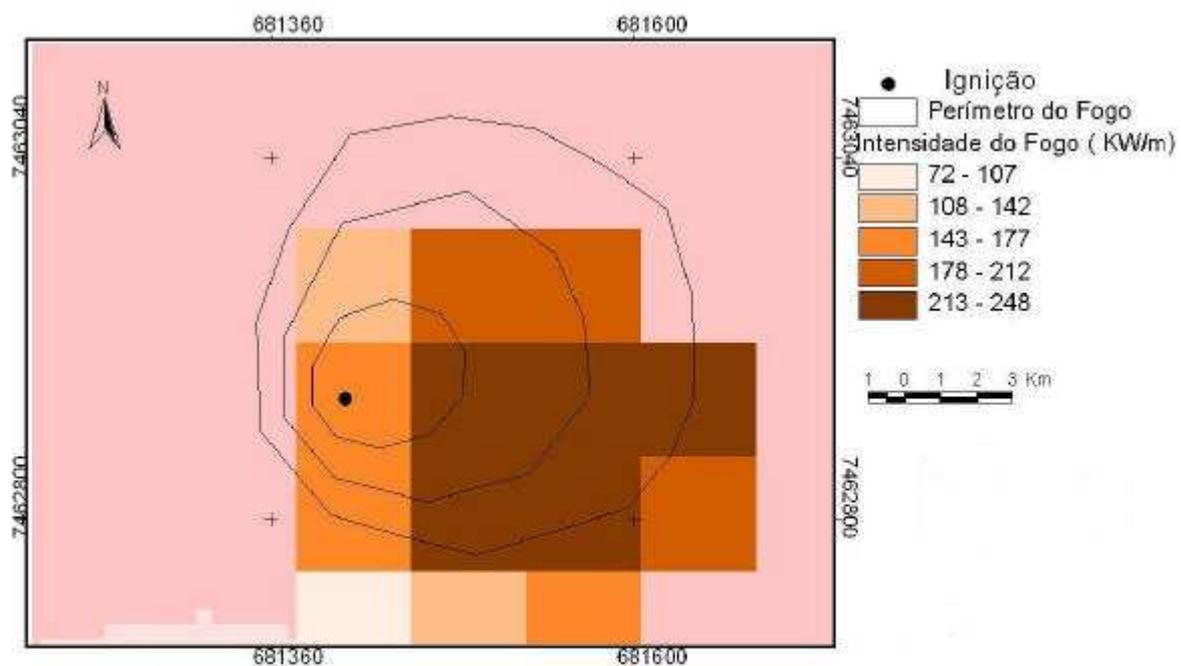


(b)

Figura 3.32: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 0.28 m/s – Horto.

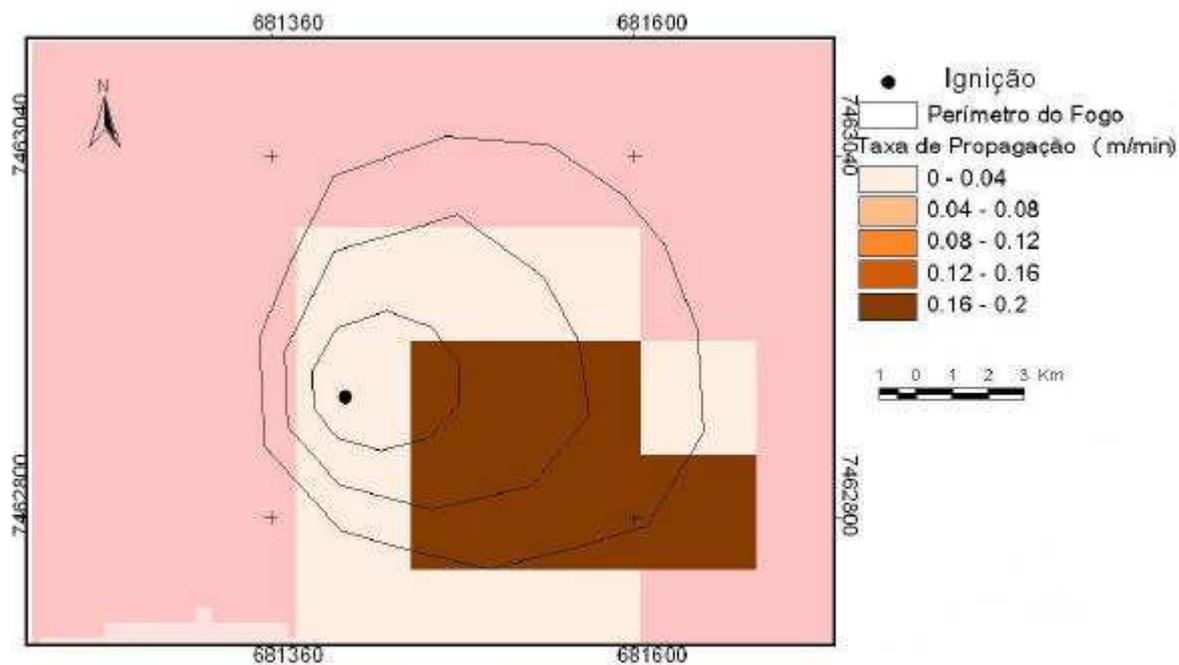


(a)

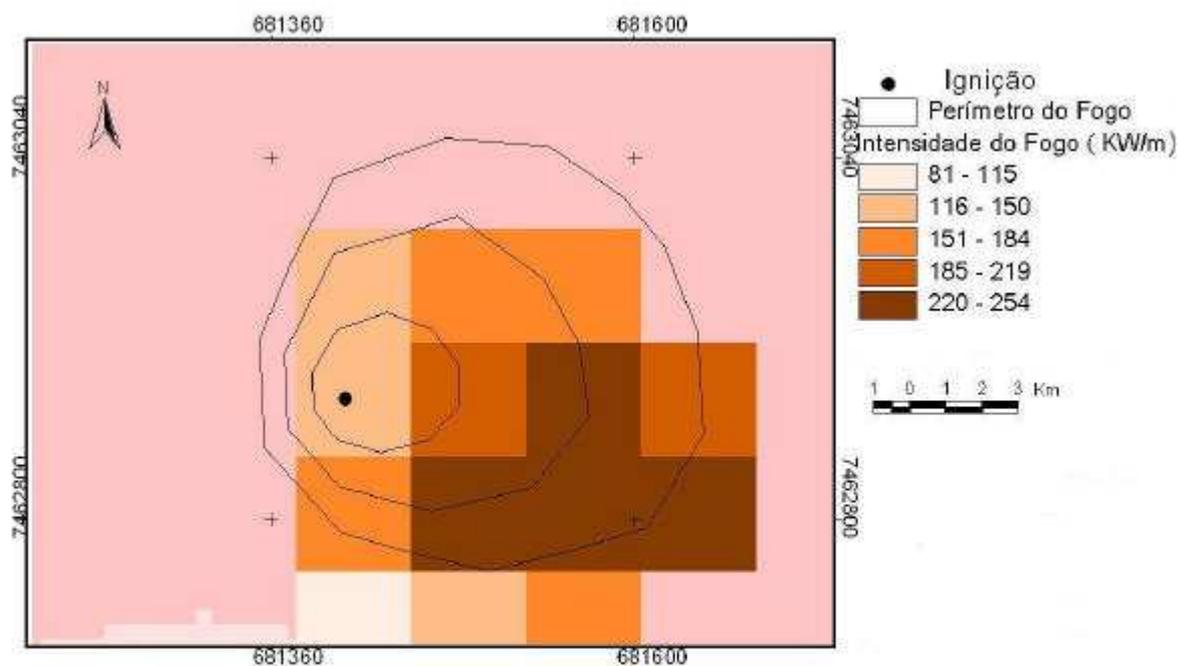


(b)

Figura 3.33: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 2.5 m/s – Horto.



(a)



(b)

Figura 3.34: (a)-(b) Taxa de propagação e intensidade do fogo obtidos a partir do modelo de combustível formado por floresta com intensidade do vento de 5.5 m/s – Horto.

O passo seguinte é a apresentação dos parâmetros relacionados com o comportamento do fogo determinados no FARSITE. Para isto, foi realizada uma simulação com dados do dia 9 de julho de 2003, devido ao fato de nesta data ter ocorrido um alto índice de risco. O foco de ignição iniciou-se no ponto com as seguintes características: elevação (538m), declividade (44%), orientação da encosta (328), vegetação (gramíneas) e cobertura de copa (1%).

O incêndio foi iniciado às 12:00 horas do dia 9. O período de queima foi de 3:00 horas estabelecidos no início da simulação. A Figura 3.35 mostra a forma do perímetro da área queimada e o tempo de avanço da propagação do fogo. Este parâmetro indica qual foi o instante que cada célula começou ser incendiada. Além de também mostrar o tempo do término da combustão.

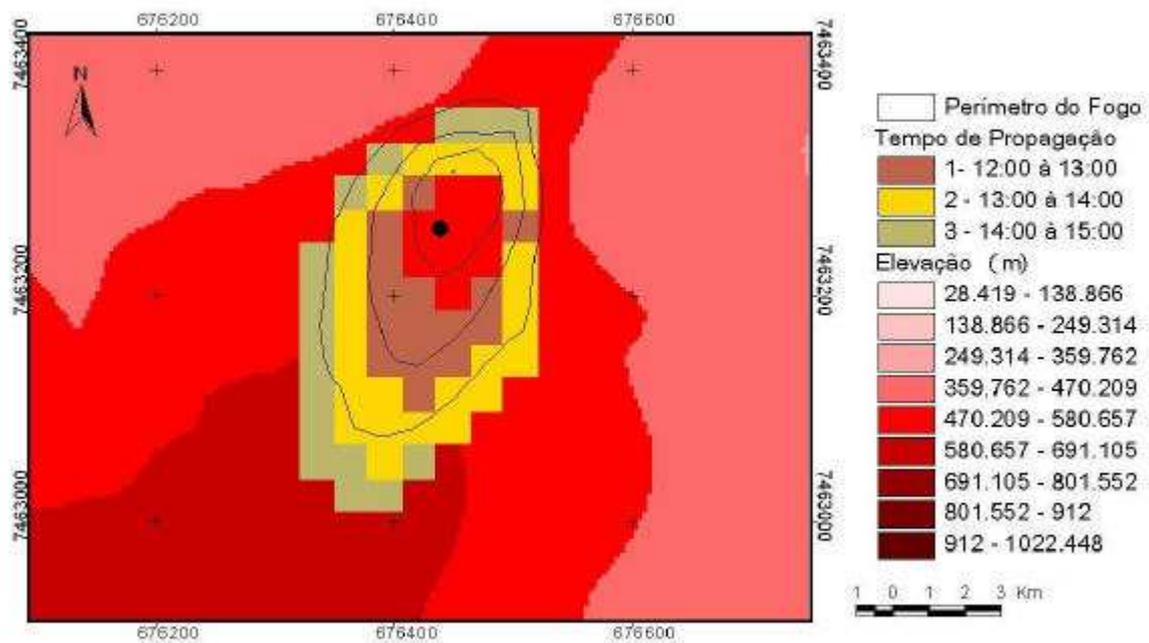


Figura 3.35: Tempo da evolução da frente da chama no terreno (horas).

Ainda, no FARSITE, podem ser observados dois tipos de área de projeção: Horizontal (projeção horizontal do terreno) e Inclinado (projeção da inclinação do terreno). Estas projeções influenciam a área queimada e o tempo de avanço da frente do incêndio. Na Figura 3.36, verifica-se este comportamento, onde a área queimada no plano inclinado é maior que plano horizontal, que é o comportamento esperado que ocorra em condições reais. Na Figura 3.36, verifica-se também que, se não houvesse

nenhum tipo de intervenção para o controle do incêndio, em uma hora teria queimado uma área horizontal de 8.000 m² nas condições estabelecidas. A área total queimada é de aproximadamente de 5 hectares na área horizontal e de 5,9 hectares na área inclinada.

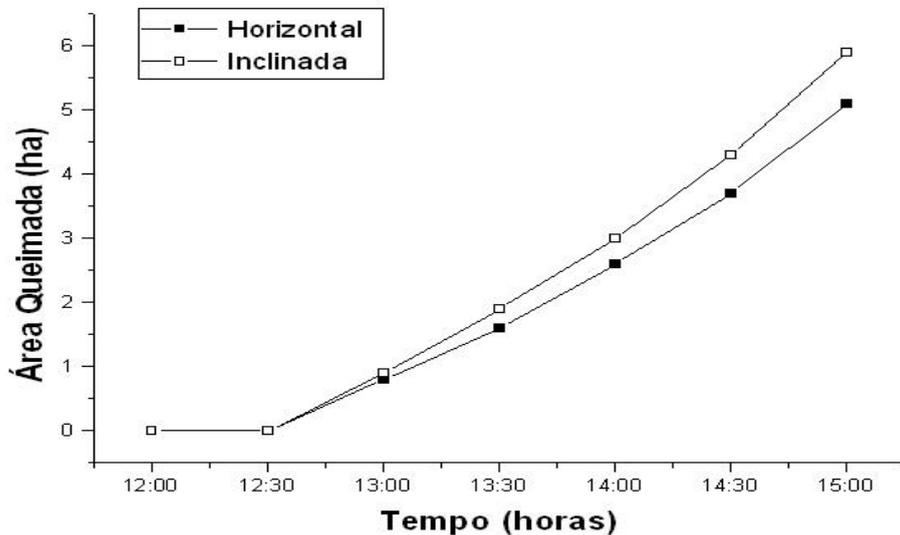


Figura 3.36: Área queimada no plano horizontal e inclinada.

Este tipo de informação permite quantificar e qualificar o dano ambiental, pois em grandes incêndios é possível confrontar área queimada, que pode ser detectada por imagem de satélite ou por meio de dados de campo utilizando o GPS, com as simulações computacionais. Com os resultados das simulações determinam-se as áreas atingidas, o tipo de vegetação e os limites de abrangência do fogo.

Nas Figuras 3.37 e 3.38, são mostrados os valores da velocidade de propagação e a sua direção. A velocidade de propagação indica que um tipo de cobertura vegetal provoca velocidade de propagação superior às obtidas por outros tipos de vegetação. Em um mesmo tipo de combustível, este parâmetro assume comportamento diferente devido ao efeito da declividade na propagação do fogo. As áreas com declive ascendente e com vento favorável têm maiores velocidade de propagação e áreas com declive descendente e com vento contra terão, naturalmente, menores velocidades de propagação. Na Figura 3.37, observa-se que a velocidade de propagação pode atingir valores de até 17 m/min.

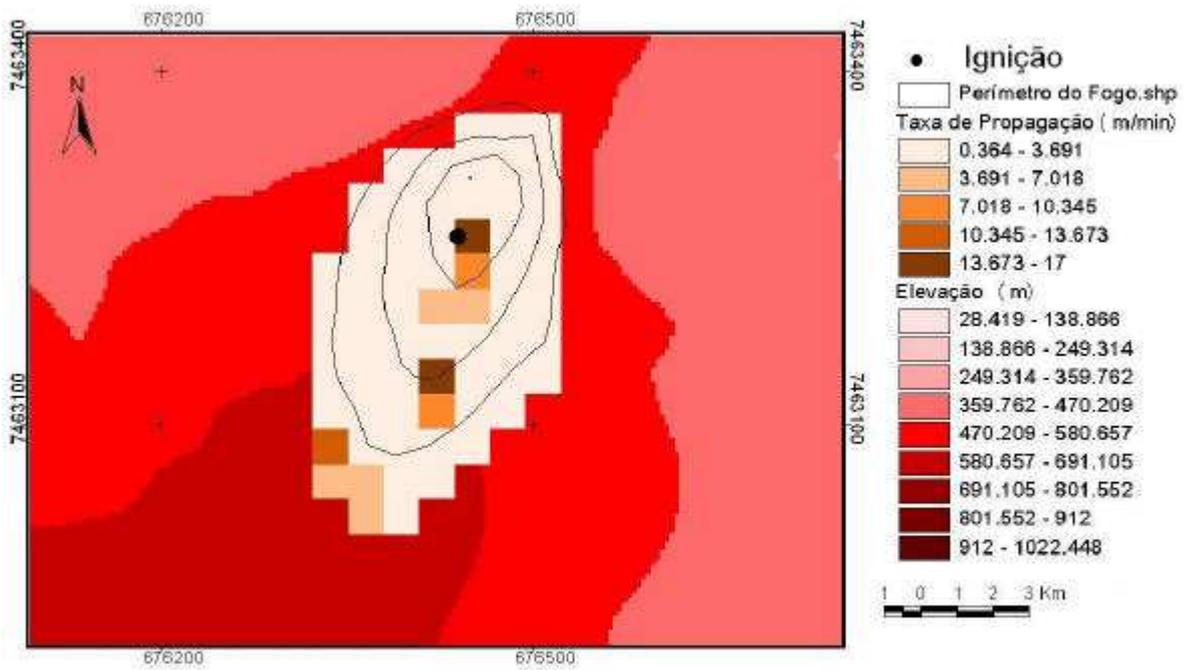


Figura 3.37: Velocidade de propagação da frente da chama no terreno.

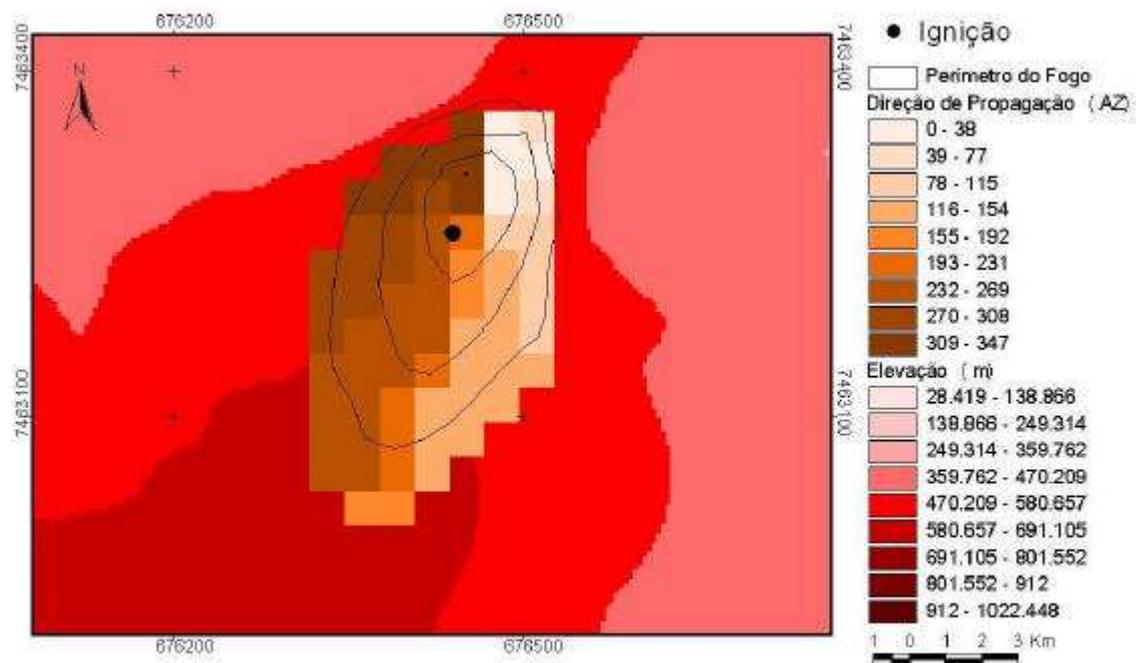


Figura 3.38: Direção do avanço da propagação da frente da chama no terreno.

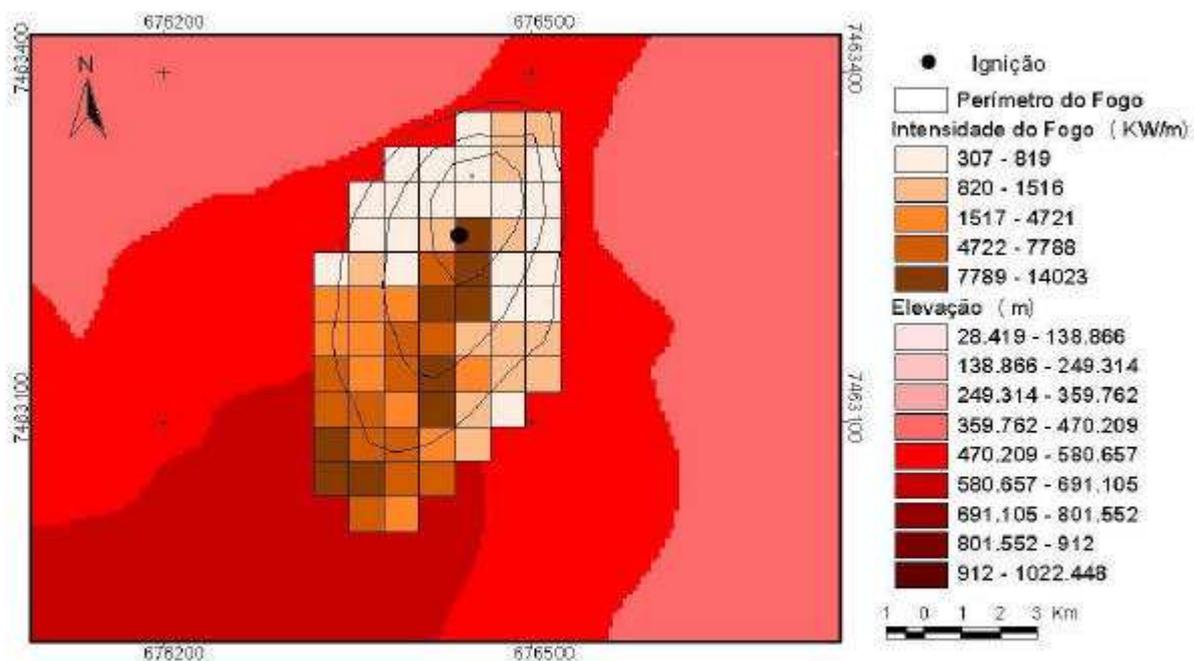


Figura 3.39: Intensidade máxima da linha de fogo (kw/m).

Com esses resultados, verifica-se que a combinação de determinadas condições ambientais pode agravar a situação de um incêndio e dificultar a ação de combate. Os dados da velocidade de propagação do fogo e a sua direção em azimute possibilitam determinar as áreas para alocar equipes de combate do fogo. Na Figura 3.39, observam-se os resultados da intensidade do fogo. Este parâmetro define a quantidade de energia liberada por unidade de comprimento da frente de fogo.

Capítulo 4

Conclusões e Propostas Futuras

Neste estudo, foi implementado e testado um sistema para estimar o risco de incêndio no Parque Nacional da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro. Para tal, utilizou-se a integração de métodos de predição de índices de risco e de modelagem computacional do avanço da frente do fogo.

A diferença dos resultados dos ciclos diurnos dos dados do *IRF* (Índice de Resistência ao Fogo) entre o Sumaré e o Horto indica a influência dos ecossistemas na determinação do índice de risco. Os resultados obtidos demonstram que existe uma boa correlação (aproximadamente 0,7) entre a ocorrência de eventos de fogo e o alto nível de *IRF*, tais como níveis médio, alto e extremo, em poucos eventos de fogo registrados o *IRF* foi estimado quando o nível era baixo. Com esses resultados, também, observou-se que mesmo que o índice indique risco alto e extremo de incêndio, ele só ocorrerá se houver ignição causada por fatores externos, uma vez que a totalidade de focos de fogo é provocada por ação antrópica.

No Parque Nacional da Tijuca, observa-se, a partir das informações fornecidas pela brigada de combate ao fogo, uma alta frequência de eventos de fogo de curta duração. Muitos desses relatos são de ações com queima de lixo, de pneu e de queda de balões. A maioria dos eventos ocorreu na margem da floresta próxima às estradas, além disso, é possível observar, por meio dos registros, que a proporção de eventos de fogo ocorridos no setor do Sumaré é aproximadamente 55% maior que no setor do Horto. Isto se deve, principalmente, aos fatores antropogênicos, devido à presença da população na circunvizinhança da área do Sumaré. E, também, pela existência de uma vegetação mais aberta e de menor porte, que é mais sujeita, inclusive, a maior estresse dadas as maiores temperaturas, alterações do microclima local e maior irradiância.

Pelas análises de correlação entre a umidade do combustível e a umidade relativa do ar, observa-se que na vegetação de gramíneas, a curva de umidade do combustível decresce à medida que a umidade do ar diminui, sendo a resposta da vegetação imediata. Na vegetação de floresta, verifica-se que a umidade do combustível acompanha a variação da umidade do ar, mas a resposta é mais lenta.

O número de registros de eventos de focos de fogo no período de 2003 e 2004, a falta de informações mais precisas sobre a localização desses eventos e da cobertura local da área que ocorreu o incêndio dificultaram a comparação dos resultados obtidos dos índices Nesterov, Monte Alegre, *FWI* e *IRF*, quando aplicados nos setores Horto e Sumaré, assim como uma aferição e avaliação da eficiência desses índices na área de estudo.

Os índices acumulativos (Nesterov, Monte Alegre, *FWI* e *IRF*) apresentaram uma inércia na resposta a variação da umidade relativa do ar e da temperatura, observando-se uma correlação menor que 85% nos anos de 2003 e 2004. O índice não acumulativo (Angstron) apresentou uma correlação de 85% e 95% com a variação da umidade relativa do ar e da temperatura. Por esses resultados, nota-se que o índice de Angstron é mais sensível a oscilações dessas variáveis meteorológicas, daí a diferença do seu comportamento em relação aos demais índices. Esta análise foi verificada nos dois setores Horto e Sumaré.

O índice *FMA* (Fórmula de Monte Alegre) apresentou resultados semelhantes nos dois setores. Verificou-se que, nos meses mais críticos no Sumaré, os índices *IRF* alcançaram as classes alta e extrema, enquanto, no Horto, não se verificou índice de nível extremo. Os resultados do *IRF* representaram melhor a diferença dos dois setores, uma vez que 55% dos eventos de focos de fogo ocorreram no setor do Sumaré.

Os índices *FMA* e *IN* mostraram uma alta correlação de 94% e 88% no Sumaré e Horto, respectivamente nos anos de 2003 e 2004. Este resultado deve-se por serem índices acumulativos, além de ambos serem corrigidos pela precipitação.

O índice meteorológico de incêndio (*FWI*) apresentou um número de dias com classificação média de grau de risco de incêndio, apresentando uma baixa correlação

com relação aos eventos de focos de fogo registrados, quando comparado com outros índices.

A distribuição da precipitação pluviométrica e a ocorrência de incêndios, tanto no Horto quanto no Sumaré, apresentaram uma relação inversa. No mês de junho, por exemplo, ocorreram 18% de incêndios e apenas 3% de precipitação anual de 2003.

O sistema implementado para determinação do diagnóstico diário específico para o risco de fogo, mostrou-se ser bastante aceitável. Os índices evidenciam boa correlação com ocorrências verificadas de focos de fogo, confirmando a sua utilidade na identificação de áreas de risco potencial. Entretanto, sugere-se que alguns esforços sejam tomados para aumentar a precisão da estimativa do risco de fogo, tais como uma base de dados histórica de registros de ocorrências de focos de fogo mais extensa e precisa para ter uma relação mais robusta entre valores de índice de risco de incêndio.

Outro enfoque deste trabalho foi o uso do código computacional FARSITE para a modelagem do avanço da frente do incêndio na área do Parque Nacional da Tijuca. O FARSITE foi utilizado para construção de cenário de avanço de fogo através da estimativa da taxa de propagação, intensidade e perímetro dos incêndios em áreas do PARNA-Tijuca.

Para este trabalho, os pontos de ignição para a realização das simulações na floresta da Tijuca foram selecionados a partir dos dados de eventos de focos de fogo registrados e dos índices de risco gerados nos setores Horto e Sumaré, com alta e baixa susceptibilidade de incêndio.

A aquisição automática de dados diários a partir das PCD's, instaladas nos setores do Horto e Sumaré, mostrou-se essencial para o estabelecimento de um sistema de simulação em condições reais.

O vento é uma das variáveis mais importantes para o comportamento do fogo, atuando na sua velocidade do avanço e no microclima, através da aceleração da evaporação direta do solo. Na análise desta variável no período crítico, nos dois setores, verificou-se a predominância de ventos com intensidade abaixo de 0,5 m/s ou de

calmaria no Horto, mostrando que dentro da floresta há ausência de vento. Já no Sumaré, a intensidade variou entre 0,5m/s a 8,8m/s indicando que nesta superfície a evaporação é maior, além de esta condição ser mais susceptível ao fogo e a sua propagação.

Os resultados das simulações demonstram a importância de uma identificação adequada dos parâmetros dos modelos de combustível para representar a vegetação do local. Isto foi uma das limitações encontradas, pois é necessária uma base de dados completa e atualizada e, se possível, a partir de imagens de satélites e inventários de combustíveis da área de estudo. As informações geradas durante as simulações tais como taxa de propagação, intensidade da linha de fogo e área ou perímetro queimado, permitem quantificar e qualificar o dano ambiental, pois, em grandes incêndios, é possível confrontar área queimada, que pode ser detectada por imagem de satélite ou por meio de dados de campo utilizando o GPS, com as simulações computacionais. Assim, possibilita-se a melhor aferição da ferramenta, no caso, FARSITE, utilizada para este estudo. Com os resultados das simulações, determinam-se as áreas atingidas, o tipo de vegetação e os limites de abrangência do fogo.

Para avaliar a sensibilidade do FARSITE, foram realizadas simulações numéricas com dados experimentais sob vegetação de savana tipo arbustiva e vegetação de savana tipo gramínea para obter fator de ajuste, onde se verificou que o resultado gerado para a vegetação arbustiva é mais próximo ao resultado do experimento, quando comparado ao resultado gerado na simulação com vegetação de gramínea. Esta diferença ocorreu devido aos parâmetros relacionados com o tipo de combustível. A partir deste fator de ajuste, pode-se estender a aplicabilidade do modelo a diferentes cenários de frente de fogo para a realização de simulações.

As taxas de propagação obtidas em vegetação de gramínea de 10,9 m/min no setor Sumaré e de 12,8 m/min no setor Horto mostram que o índice obtido de um ecossistema de floresta não será um indicador da susceptibilidade a incêndio em uma vegetação de gramínea. O índice de risco (*IRF*) representa as condições locais da área. Uma vez calculado o índice, a partir de dados obtidos de um ecossistema de floresta, ele não será um bom indicador da susceptibilidade a incêndio em um ambiente com cobertura de gramínea, mesmo que área seja próxima aos dados obtidos pelas PCD's.

Este comportamento é observado através da pequena variação diurna do índice no setor do Horto, enquanto, no Sumaré, a variação diurna é 50% maior em alguns períodos. Além disso, no Horto, observa-se uma inércia na resposta do índice diferente da resposta na área do Sumaré que é imediata.

O mesmo comportamento é observado com os dados de taxa de propagação obtidos em vegetação de floresta nos setores Sumaré de 1,8 m/min e Horto de 0,0 m/min;

No setor do Horto, no cenário com vegetação de gramínea, com intensidade do vento variando de 0 a 1m/s, os valores da taxa de propagação foram próximos ou superiores aos valores obtidos no setor do Sumaré com intensidade do vento variando de 2 a 5 m/s, indicando a influência das outras variáveis no comportamento do fogo em terrenos heterogêneos.

A taxa de propagação obtida em vegetação de gramínea foi igual a 18 m/min e, em vegetação de floresta secundária foi igual a 1,5 m/min, o que mostra a importância do tipo de vegetação no comportamento do fogo.

A variação da intensidade do vento no Sumaré em vegetação gramínea apresenta um aumento significativo na taxa de propagação (calmaria= 1,8m/min; 2,8m/s= 5,5m/min; 5,5m/s= 5,3 m/min). Este comportamento é detectado também no Horto em vegetação gramínea (calmaria= 3,6m/min; 2,8m/s= 2,8m/min; 5,5m/s= 4,6 m/min).

Os dados da variação da taxa de propagação com relação ao vento no setor Horto em gramínea (calmaria= 3,6m/min; 2,8m/s= 2,8m/min; 5,5m/s= 4,6 m/min) não é linear, o que mostra a importância das outras variáveis no comportamento do fogo em terrenos com topografia heterogênea.

A partir desses resultados, verifica-se que a combinação de determinadas condições ambientais pode agravar a situação de um incêndio e dificultar a ação de combate. Os dados da velocidade de propagação do fogo e a sua direção em azimute possibilitam determinar as áreas para alocar equipes de combate do fogo.

A integração de um método de estimativa de risco de incêndio a um sistema de simulação do comportamento do avanço da frente do fogo mostrou-se eficiente na construção de cenário de frente de fogo para detecção de áreas críticas e para o monitoramento ambiental.

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros, a saber:

- calibrar e validar o modelo NFDRS utilizado nesta tese;
- efetuar uma análise de sensibilidade rigorosa dos parâmetros dos modelos, seja a partir de um conjunto de dados reais mais abrangente do que o empregado nesta tese, ou seja a partir de dados sintéticos;
- calibrar e aferir os modelos propostos neste trabalho com uma base mais completa de eventos de focos de fogo, incluindo dados meteorológicos e o estado da vegetação, entre outras informações;
- empregar rede neural pode ser considerada uma boa tentativa para alcançar um melhor desempenho para estimar o índice de risco com dados meteorológicos locais que estão acessíveis e incluir variáveis que representam o comportamento antrópico, que são importantes na determinação do risco de incêndio;
- realizar simulações em áreas com dados *in situ* de observação do comportamento de incêndio em área de vegetação e georreferenciadas para aferições das simulações;
- desenvolver modelos de combustível a partir de imagens de satélites e inventários de combustíveis da área de estudo;
- investigar a possibilidade de utilização e combinação de dados NDVI de novos sensores com resolução espacial de 1 km ou maior.

Referências Bibliográficas

- ALBINI, F.A., 1985, "A model for fire spread in wildland fuel by radiation", *Combustion Science and Technology*, v. 42, pp. 229-258.
- ALBINI, F.A., 1983, *Potencial spotting distance from wind-driven surface fires*, In: United States Department of Agriculture, Forest Service, Research paper INT - 309.
- ALBINI, F.A., BAUGHMAN, R.G., 1979, *Estimating Windspeeds for Predicting Wildland Fire Behavior*. In: Report USDA Forest Service Gen. Technology. Rep. INT-221, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah 84401.
- ALBINI, F.A., 1976, *Estimating Wildfire Behavior and Effects*. In: United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT -30, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- ALBINI, F.A., 1967, "A physical model for firespread in brush". *Proceedings of the International Eleventh Symposium Combustion*, pp. 553-560, Pittsburgh, Pa.
- ALBRIGHT, D., MEISNER, B.N., 1999, "Classification of fire simulation systems", *Fire Management Notes*, v. 59, n. 1, pp. 5-12.
- ALEXANDER, M.E., 1982, *Canadian Forest fire danger rating system: an overview* Canadian Forestry Service Northern Forestry Res. Center.
- ANDERSON, D. H., CATCHPOLE, E. A., MESTRE, N. J., et al., 1982, "Modelling the Spread of Grass Fires", *Journal Australian Mathematical Society*, v. 23, pp 451-466.

- ANDERSON, D.E., 1969, *Heat transfer and fire spread*, States Department of Agriculture, Forest Service, Research paper INT - 69.
- ANDREWS, P.L., BEVINS, C.D., SELI, R.C., 2003, *BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide*. In: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106.
- ANDREWS, P.L., BEVINS, C.D., 1998, "Update and Expansion of the BEHAVE Fire Behavior Prediction System", *III International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal
- ANDREWS, P.L., 1986, *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system –BURN subsystem, part 1*. In: United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-194, Intermountain Research Station, Ogden, UT.
- ANDREAE, M.O., 1992. Biomass Burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel Levine, p. 3-21, MT Press, Cambridge Massachusetts, USA.
- AURÉLIO, M., VELLASCO, M., LOPES, C.H., 1999, *Descoberta de Conhecimento e Mineração de Dados*. 1 ed. Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC–Rio.
- BACA, J.F.M., 2002, *Dinâmica da Paisagem: métodos analíticos, modelos de classificação e simulação prognóstica, sob a ótica geocológica*. D.Sc. PPGG-IGEO/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BALL, G.L., GUERTIN, D.P., 1992, "Improved fire growth modeling", *International Journal of Wildland Fire*, v. 2, pp. 47-54.

- BALL, G.L., GUERTIN, D.P., 1991, "FIREMAP", In: Nodvin, S.C., Waldrop, T.A., (eds), *Fire and the environment: Ecological and cultural perspectives*, Knoxville, TN. Asheville, NC, USDA Forest Service.
- BEALL, H.W., 1967, *Research in the measurement of forest fire danger*: Canadian Forest Service, Forest Fire Research Inst. Ontario Info FF-X-8.
- BEER, T., 1990, *Modelling Australian Bushfire*, In: Report CSIRO Bushfire Research Program, PMB1, PO Mordialloc, Vic. 3195 Australia.
- BENJAMIN, J.R., CORNELL, C.A., 1970, *Probability, statistics, and Decision for Civil Engineers*, 1ed. McGraw-Hill.
- BOVIO, G., NOSENZO, A., 1994, "Comparison between methods of foresting danger of forest fires". In: Proceedings 2nd International Conference of Forest Fire Research, pp. 747-758, Coimbra, Portugal, nov.
- BRADSHAW, L.S., DEEMING, J.E., BURGAN, R.E., COHEN, J.D., 1984, *The 1978 National Fire Danger Rating System*, United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report INT-169, Intermountain Forest and Ranger Experiment Station, Ogden, UT.
- BURGAN, R.E., KLAVER, R.W., KLAVER, J.M. 1998, "Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations", *International Journal of Wildland Fire*, v. 8, n. 3, pp. 159-170.
- BURGAN, R.E., 1988, *Revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System*. In: USDA Forest Service, Res. Pap. SE-273, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC.
- BURGAN, R.E., 1987, *Concepts and interpreted examples in advanced fuel modeling*. In: United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical

Report INT-238, Intermountain Forest and Ranger Experiment Station, Ogden, UT.

BURGAN, R.E., ROTHERMEL, R.C., 1984, *Behave: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-Fuel Subsystem*. In: Report USDA Forest Service, Gen. Technology. Rep. INT-167, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah 84401.

BYRAM, G.M., 1959, "Combustion of Forest Fuels". In: *Forest Fire: Control and Use*, McGraw-Hill. New York.

CAHOON, D.R., STOCKS, B.J., et al., 1994, "Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia", *Journal of Geophysical Research*, v.19, pp. 18,627-18,638.

CARAPIÁ, V.R., 2001, *Modelagem Computacional de Propagação de Incêndios em Florestas*. M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

CARAPIÁ, V.R., SILVA, R.M., FRANÇA, G.B., LANDAU, L., et al. 2003, "Monitoramento de risco de incêndios no Parque Nacional da Tijuca e nas áreas onde se situam as linhas de transmissão", *II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica- Citenel*, v. 1, pp. 1154-1158.

CARLSON, J.D., BURGAN, R.E., 2003, "Review of user's need for estimation: the Oklahoma example", *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 8, pp.1601-1620

CARREGA, P., 1991. "A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France", *International Journal of Wildland Fire*, n. 1, pp. 79-86.

CATCHPOLE, E.A., DE MESTRE, N., 1986, "Physical models for a spreading line fire", *Australian Forestry*, v. 49, n. 2, pp.102-111.

- CHANDLER, C., CHENEY, P., THOMAS P., et al., 1983. *Fire in forestry: forest fire behavior and effects*, New York, John Wiley & Sons.
- CIANCIULLI, P.L., 1981. *Incêndios Florestais: prevenção e combate*, 1 ed. São Paulo, Nobel.
- CHENEY, N.P., 1991, “Models used for fire danger rating in Australia”. In: *Proceedings of the Conference on Bushfire Modeling and Fire Danger Rating Systems*, pp.19-28, Canberra, Australia.
- CHUVIECO, E., SALAS, F.J., VEGA, C., 1997, “Remote sensing and GIS for long-term fire risk mapping”. In: Chuvieco, E., (ed), *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*, chapter 5, Alcalá de Henares, Spain , Universidad de Alcalá.
- CHUVIECO, E., SALAS, F.J., 1996, “Mapping the Spatial Distribution of Forest Fire Danger Using GIS”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 3, pp. 333-345.
- CLARK, T. L., JENKINS, J. L., COEN, J., et al., 1996, “A Coupled Atmospheric-Fire Model: Convective Feedback on Fire-line Dynamics”, *Journal of Applied Meteorology*, v.35, pp. 875-901.
- CLARKE, K.C., BRASS, J.A., RIGGAN, P.J., 1994, “A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction”, *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, v. 60, n. 11, pp. 1355-1367.
- COELHO NETTO, A.L., 1985, *Surface hidrology and soil erosion in a tropical rainforest drainage basin*, Ph.D. dissertation, University of Leuven, Belgium.
- COHEN, J., DEEMING, J.E., 1985, *The National Fire-Danger Rating System: basic equations*: United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-82, Pacific Southwest Forest and Ranger Experiment Station, Berkeley, CA.

- DEEMING, J.E., BURGAN, R.E., COHEN, J.D., 1977, *The National Fire-Danger Rating System-1978*: United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- FANG, J.B., STEWARD, F.R., 1969, "Flame spread through randomly packed fuel particles", *Combustion and Flame*, v.13, n. 4, pp.392-398.
- FERNANDES, G.D.A., 2003, *Simulação de Incêndio Florestal no Parque Estadual Serra do Rola-Moça, Minas Gerais, utilizando o FARSITE*. D.Sc. PPGCF/UFV, Viçosa, MG, Brasil.
- FERNANDES, M.C., ROSAS, R.O., COELHO NETTO, A.L., 1998, "Potencialidade de Ocorrência de Queimadas no Maciço da Tijuca/ RJ: Uma Abordagem Utilizando Geoprocessamento", IX *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- FERNANDES, M.C., 1998, *Geoecologia do Maciço da Tijuca-RJ: Uma abordagem geo-hidrológica*. M.Sc., PPGG-IGEO/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FEARNSIDE, P. M., TARDIN, A. T., MEIRA FILHO, L. G., 1990, *Deforestation rate in Brazilian Amazônia*. In: Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil.
- FERRAZ, S.F.B., VETTORAZZI, C.A., 1998, "Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG)", *Scientia Forestalis*, n. 53 (Jun), pp. 39-48.
- FINNEY, M. A., 1998, *Farsite: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation*. In: USDA Forest Service, Intermountain Fire Sciences Laboratory, Missoula, MT. <http://www.montana.com/sem>
- FONS, W., 1946, "Analysis of fire spread in light forest fuels", *Journal Agricultural Research*, v. 72, n. 3, pp. 93-121

- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992, *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. In: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, Resp. ST-X-3, Ottawa, Canada.
- FRANÇA, G. B., CARAPIÁ, V., TORRES JR, A. R., et al. 2005, “An operational System for Forest Fires Monitoring at Tijuca Forest National Park”, *Agricultural and Forest Meteorology*.
- FRANCISCO, C.N., 1995, *O uso de sistemas geográficos de informações (SGI) na elaboração de planos de manejo de unidades de Conservação: uma aplicação no Parque Nacional da Tijuca*, M.Sc., Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- FRANSEN, W. H., 1971, “Fire Spread Through Porous Fuels from the Conservation of Energy”, *Combustion & Flame*, v.16, pp. 9-16.
- FREIRE, S., CARRÃO, H., CAETANO, M. R., 2002, *Produção de Cartografia de Risco de Incêndio Florestal com Recurso a Imagens de Satélite e Dados Auxiliares*: Instituto Geográfico Português, Lisboa.
- FREITAS, P.J., 2001. *Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas: Com Aplicação em Arena*. Ed. Visual Books, p.322.
- FRENCH, I.A., 1992, *Visualisation techniques for the computer simulation of bushfires in two dimensions*. M.Sc. Thesis University of New South Wales, Australian Defence Force Academy, Australia.
- GEOHECO, 2000, *Diagnóstico do Estado Atual da Qualidade Ambiental do Geoecossistema do Maciço da Tijuca*. In: Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO), CCMN/UFRJ, Rio de Janeiro.
- GISBORNE, H.T., 1936, “The principles of measuring forest fire danger”, *Journal of Forestry*, n. 31, pp. 979-980.

- GOLDAMMER, J.G., 1999, "Forest on fire", *Science*, v. 284, pp. 1782-1783.
- GRISHIN, A. M., ALEKSEYEV, N. A., BRABANDER, O. P., et al., 1984. "Propagation of Forest Fire-Induced Thermals in the Ground Layer of the Atmosphere", *Heat Transfer-Soviet Reserch*, v. 16, n. 6, pp. 28-38.
- GRISHIN, A. M., PERMINOV, V. A., 1993, "Radiative and Combined Heat Exchange at the Onset and Propagation of Crown Forest Fires", *Heat Tranfer Rsearch*, v. 25, n. 5, pp. 679-684.
- GRUPE, M.A., 1998, *Assessing the applicability of the terrestrial ecosystem survey for FARSITE*. M.Sc., University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
- HAINES, T.K., MARTINEZ, J., CLEAVES, D.A., 1998, "Influences on prescribed burning activity in the United States National Forest System", *International Forest Fire News*, pp. 43-46.
- HARGROVE, W.W., GARDNER, R.H., TURNER, M.G., et al, 2000, "Simulation fire patterns in heterogeneous landscapes", *Ecological Modelling*, v. 135, pp. 243-263.
- HARGROVE, W.W., GARDNER, R.H., TURNER, M.G., et al., 1993, "Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes", Unpublished draft provided by principal author, pp. 1-42.
- HAO, W.M., 1990, Estimates of Annual and Regional Release of CO₂ and other Trace Gases to the Atmosphere from Fires in Tropics: In: *Fire in the Tropical Biote: ecosystem processes and global challenges*, Springer Verlag, Berlin.
- HOTTEL, H.C., WILLIAM, G.C., STEWARD, F.R., 1965, "The modeling of firespread through a fuel bed". In: *Proceedings of the International Tenth Symposium Combustion*, pp.997 –1007, Pittsburgh, Pa.
- IBAMA/SEMAM/Governo Federal: Programa Nacional de Conservação e Desenvolvimento Florestal Sustentado. Brasília, 1991, pp.95.

- KALABOKIDIS, K.D., HAY, C.M., HUSSIN, Y.A., 1991, “Spatially Resolved Fire Growth Simulation”. In: *Proceeding of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology*, pp. 188-195, Missoula, Society of American Foresters, Washington, DC.
- KNIGHT, I., COLEMAN, J., 1993, “A fire perimeter expansion algorithm based on Huygen’s wavelet propagation”, *International Journal Wildland Fire*, v.3, n. 2, pp. 73-84.
- KOURTZ, P.H., O’REGAN, W.G., 1971, “A model for a small forest fire to simulate burned and burning areas for use in a detection model”, *Forest Science*, v. 17, n. 2, pp. 163-169.
- LARCHER, W., 2000, *Ecofisiologia Vegetal*. 1 ed. São Carlos, SP, Rima.
- LIMA, G.S., FENNER, P.T., 1992, “Características e modelagem de materiais combustíveis florestais”. In: *I Encontro sobre Incêndios Florestais*, pp. 87-96, UNESP, FEPAF, Botucatu, SP.
- LOPES, A.M.G., CRUZ, M.G., VIEGAS, D.X., 2002, “FireStation – an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography”, *Environmental Modelling & Software*, v. 17, pp. 269-285.
- LOPÉZ, A., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., BURGAN, R.E., 2002, “Integration of satellite sensor data, fuel type maps, and meteorological observations for the evaluation of forest fire risk at the pan-European scale”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 13, pp. 2713-2719.
- LOURENÇO, L., 1991, “Uma fórmula expedita para determinar o índice meteorológico de risco de eclosão de fogos florestais em Portugal Continental”, *Separata de Cadernos Científicos sobre Incêndios Florestais*, n. 2, Coimbra.

- MACEDO, W., SARDINHA, A. M., 1985, *Fogos Florestais*. Portugal, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- MACKAY, G., JAN, N., 1984, "Forest fires as critical phenomena", *Journal of Physics, A: Mathematical and General*, v. 17, pp. 757-760.
- MANZI, A.O., 2005, LBA: Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia, <http://lba.cptec.inpe.br/lba/> (18/08/2005 e 24/08/2005).
- MATOS, D.M.S., SANTOS, C.J.F., CHEVALIER, D.R., "Fire and restoration of the largest urban forest of the world in Rio de Janeiro City, Brazil", *Urban Ecosystems*, v. 6, pp. 151-161.
- McALEVY, R.F., MAGEE, R., WRUBEL, J.A., 1967, "Flame spreading at elevated pressures over the surface of igniting solid propellants in oxygen / inert environments", In: *USDA Forest Service Research Paper INT*.
- McARTHUR, A .G., 1969, "The Tasmanian bushfires of 7th February, 1967, and associated fire behaviour characteristics". *The Technical Co-operation Programme Mass Fire Symposium*, Canberra, Australia.
- McARTHUR, A.G., 1967, *Fire behavior in eucalypt forests*. In: Department of National Development, Forestry and Timber Bureau Leaflet, n. 107, Canberra, Australia
- McARTHUR, A.G., CHENEY, N.P., 1966, "The characterization of fire in relation to ecological studies", *Australian Forest Research*, v. 2, n. 3, pp. 36-45.
- MOULA, M., 1996, *Modelisation Des Feux de Biomasse en Savane Africaine et Evaluation des Emissions dans l'Atmosphere de Constituants en Trace*. D.Sc., L'Universite Paul Sabatier de Toulouse, France.
- MUTCH, R. W., 1970, "Wildland Fires and Ecosystems – A Hypothesis", *Ecology*, v.51, n. 6, pp. 104-1051.

- NOBLE, I.R., BARY, G.A.V., GILL, A.M., 1980, "McArthur's fire danger meters expressed as equations", *Australian Journal Ecology*, v. 5, pp. 201-203.
- OHTSUKI, T., KEYES, T., 1986, "Biased percolation: Forest fires with wind", *Journal of Physics, A: Mathematical and General*, v. 19, pp. 281-287.
- OLIVEIRA, R.R., ZAÚ, A.S., LIMA, D.F., et al. 1995, "Significado ecológico da orientação de encostas no maciço da Tijuca", *Oecologia Brasiliensis*, v. 1, pp. 523-541.
- PAGNI, P.J., PETERSON, T.G., 1973, "Flame spread through porous fuels". *14 th Symposium (International) on Combustion*, USDA Forest service, Washington, DC, Pittsburgh: The Combustion Institute.
- PEREIRA, A.C.J., 2002, *Métodos de Geoprocessamento na Avaliação da Susceptibilidade do Cerrado ao Fogo*, D.Sc., PPG-ERN/UFSCar, São Carlos, SP, Brasil.
- PEREIRA, M. C., SETZER, A.W., 1993, "Spectral characteristics of fire scar in Landsat-5 TM images of Amazônia", *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, pp. 2061-2078.
- PHILLIPS, C., NICKEY, B., 1978. "The Concept of Spatial Risk and Its Application to Fire Prevention". *Fire Managment Notes*, v. 39, pp. 7-8, 19.
- PIVELLO, V.R., NORTON, G.A., 1996, "FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas", *Journal of Applied Ecology*, v. 33, pp. 348-356.
- PHULPIN, T., LAVENU, F., BELLAN, M. F., et al., 2002, "Using SPOt-4 HRVIR and VEGETATION sensors to assess impact of tropical forest fires in Roraima Brazil", *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, pp. 1943-1966.

- PYNE, S.J., ANDREWS, P.L., LAVEN, R.D., 1996, *Introduction to Wildland Fire*, 2 ed. New York, NY, Wiley Publishers.
- PYNE, S.J., 1991, “Sky of ash, earth of ash: a brief history of fire in the United States”:
In: Levine J.S., (ed.), *Global Biomass Burning: Atmospheric Climatic and Biospheric Implications*, chapter 61, Cambridge Massachusetts, USA, ed. MIT Press.
- RICHARDS, G. D., 1995, “A General Mathematical Framework for Modelling Two-Dimensional Wildland Fire Spread”, *International Journal Wildland Fire*, v. 5, n. 2, pp. 63-72.
- RICHARDS, G. D., 1990, “An Elliptical Growth Model of Forest Fire Fronts and Its Numerical Solution”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 30, pp.1163-1179.
- ROTHERMEL, R. C., 1972, *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*: United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-115.
- ROTHERMEL, R.C., 1991, “Predicting Behavior of the 1988 Yellowstone Fires: Projections versus Reality”, *International Journal Wildland Fire*, v.1, n. 1, pp. 1-10.
- SAMPAIO, O.B., 1999, *Análise da Eficiência de Quatro Índices, na Previsão de Incêndios Florestais para a Região de Agudos-SP*. D.Sc., UFPR, Paraná.
- SAMPAIO, O.B., 1991, *Estudo Comparativo de índice, para previsão de incêndios florestais, na região de Coronel Fabriciano*, M.Sc., UFV, Viçosa, MG.
- SANTOS, R.R., 2004, *Determinação de um Índice de Alerta de Queimadas Utilizando o Modelo Meteorológico Mbar e Dados AVHRR*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil.

- SETZER, A, et al., 1991, Amazônia biomass burning in 1987 and na estimate of their tropospheric emissions, *Ambio*, v.20, p.19-22.
- SCHROEDER, W., 2001, *Identificação de padrões climatológicos que contribuem para a ocorrência de incêndio em áreas de Cerrado usando dados AVHRR/NOAA-14*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil.
- SILVA, R.M., CARAPIÁ, V.R., TEMPONI, L., et al. 2004, “Monitoramento de risco de alerta para combate de incêndios no Parque Nacional da Tijuca-RJ”, XIII *Congresso Brasileiro de Meteorologia*.
- SISMANOGLU, R.A., SETZER, A.W., JUSTINO, F.B., et al., 2002, “Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no Cptec”. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, pp. 1991-1999, Foz do Iguaçu, PR, Agosto.
- SOARES, R.V., 1994, “Os incêndios florestais no Brasil: problemas e perspectivas”, *Floresta*, Curitiba, pp. 104.
- SOARES, R.V., 1998, “Desempenho da “Fórmula de Monte Alegre” Índice Brasileiro de Perigo de Incêndios Florestais”, *Cerne* 3, pp. 19-40.
- SOARES, R.V., 1972, “Índice de Perigo de Incêndio”. *Floresta*, v. 3, n. 3, p. 19-40.
- SOUZA,P.A.L, SISMANOGLU, R.A., LONGO, K.M., 2004, “Avanço no monitoramento de queimadas realizado no INPE”, XIII *Congresso Brasileiro de Meteorologia*.
- STAUFFER, D., 1985, *Introduction to percolation theory*, London, Taylor & Francis.
- STEWART, F.R., (1974), “Fire spread through a fuel bed”. In: Blackshear, P.I., (ed.), *Heat transfer in fires: thermophysics, social, aspects, economic impact*, 1 ed., Washington DC, Ed. Scripta Book Company.

- STOCKS, B.J., LAWSON, B.D., ALEXANDER, M.E., 1989. "The Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview", *Forest Chronicle*, v. 65, n. 4, pp. 258-265.
- TARIFA, C.S., TORRALBO, A.M., 1967, "Flame propagation along the interface between a gas and a reacting medium". *Eleventh Symposium (International) on Combustion*, Berkeley, California, USA.
- TELITSYN, G. P., 1970, "Logarithmic Fire Danger Index", *Lesnoy e Khozyaystvo*, Russia, v. 11 pp. 6-10.
- THOMAS, P.H., 1967, "Some aspects of the growth and spread of fires in the open", *Forestry*, v. 40, pp. 139-64.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R., 1955, *The water balance*. 1ed. New Jersey, Publications in climatology - Laboratory of Climatology.
- VAN WAGNER, C.E., 1993, "Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine", *Canadian Journal Forest Research*, v. 23, pp. 442 - 449.
- VAN WAGNER, C.E., 1987, *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*: Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa, Ontario.
- VAN WAGNER, C.E., 1977, "Conditions for the Start and Spread of Crownfire", *Canadian Journal Forest Research*, v. 7, pp. 23-24.
- VAN WAGNER, C.E., PICKETT, T.L., 1975, *Equations and FORTRAN IV program for the 1976 metric version of the Forest Fire Weather Index*: Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station. Info. Rep. OS-X-58.
- VAN WAGNER, C.E., 1970, *New developments in forest danger rating*: Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station. Info. Rep. OS-X-19.

- VAN WAGNER, C.E., 1969, "A simple fire growth model", *Forestry Chron*, v. 45, pp.103-104.
- VAN WAGNER, C.E., 1966. *A Comparison of American and Canadian forest fire danger rating systems*: Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station Info. Rep. OS-X-2.
- VASCONCELOS, M., GUERTIN, D.P., 1992, "FIREMAP. Simulation of fire growth with a Geographic Information System", *International Journal of Wildland Fire*, v. 2, pp. 87-96.
- VOLPATO, M. M. L., 2002, *Imagens AVHRR-NOAA para Determinação do Potencial de Incêndio em Pastagens*, D.Sc. Faculdade de Engenharia Agrícola/UEC, Campinas, SP, Brasil.
- WeatherPro3, User's Guide Version for Windows. REMSOFT - Fire Management Software.
- WALLACE, G., 1993, "A Numerical Fire Simulation Model", *International Journal Wildland Fire*, v. 3(2), pp. 111-116.
- WARD, D.E., SUSSOT,R.A., KAUFFMAN,J.B., *et al.*, (1992), "Smoke and fire characteristics for Cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment", *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. D13, pp. 14601-14619.
- WEBER, R.O., 1991, "Modelling fire spread through fuel beds", *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 17, pp. 67-82.
- WEINSTEIN, D., GREEN, K., CAMPBELL, J., FINNEY, M., 1995, "Fire growth modeling in an integrated GIS environment", *Fifteenth Annual ESRI User Conference*, Palm Springs, California, may.
- WOLFRAM, S., 1984, "Cellular automata as models of complexity", *Nature*, v. 311, pp. 419-424.

Anexo I

NFDRS – Pseudocódigo utilizado para o cálculo

⇒ Cálculo do conteúdo de umidade do material combustível

Cálculo do conteúdo de umidade em equilíbrio do combustível:

Se $UR < 10 \%$

$$EMC = 0.03229 + 0.281073 * UR - 0.000578 * temp * UR \quad (I.1)$$

Se $UR \geq 10 \%$ & $UR < 50\%$

$$EMC = 2.22749 + 0.160107 * UR - 0.014784 * temp \quad (I.2)$$

Se $UR \geq 50 \%$

$$EMC = 21.0606 + 0.005565 * UR^2 - 0.00035 * UR * temp - 0.483199 * UR \quad (I.3)$$

$EMC_{obs} = f(temp_{obs}, UR_{obs})$ temp. observada e UR observada

$EMC_{min} = f(temp_{max}, UR_{min})$ temp. máxima e UR mínima

$EMC_{max} = f(temp_{min}, UR_{max})$ temp. mínima e UR máxima

$EMC_{prm} = f(temp_{prm}, UR_{prm})$ temp. combustível e UR combustível

UR = umidade relativa (%)

$temp$ = temperatura do bulbo seco (°F)

EMC = conteúdo de umidade em equilíbrio

EMC_{obs} = conteúdo de umidade em equilíbrio observada

EMC_{max} = conteúdo de umidade em equilíbrio máxima

EMC_{min} = conteúdo de umidade em equilíbrio mínima

EMC_{prm} = conteúdo de umidade em equilíbrio referente ao combustível

Cálculo da pressão do vapor saturado

$$SATVPN = \exp\left(\frac{1.81 + (temp_{min} * 17.27 - 4717.31)}{(temp_{min} - 35.86)}\right) \quad (I.4)$$

$SATVPN$ = pressão do vapor saturado

Cálculo da UR mínima e máxima para o período de 24-horas

$$UR_{\max} = 100.0 * \left(\frac{AMBVP}{SATVPN} \right) \quad (I.5)$$

$$UR_{\min} = 100.0 * \left(\frac{AMBVP}{SATRPX} \right) \quad (I.6)$$

onde:

AMBVP = pressão do vapor ambiente

SATVPN = pressão do vapor saturado na temperatura mínima

SATVPX = pressão do vapor saturado na temperatura máxima

⇒ **Modelo de Umidade do Combustível Morto (MC1)**

Fuel: 1-hora (intervalo de tempo)

Se a umidade da madeira do combustível não é usado = 0

$$MC1 = 1.03 * EMC_{prm} \quad (I.7)$$

Se a umidade da madeira do combustível é usado ≠ 0

$$MC1 = \frac{(4.0 * EMC_{prm} + MC10)}{5.0} \quad (I.8)$$

MC1 = conteúdo de umidade do combustível no passo de tempo de 1-hora

MC10 = conteúdo de umidade da madeira do combustível (stick) no passo de tempo de 10-hora

Se houver precipitação no período observado

$$MC1 = 35.0$$

Cobertura de nuvem	Correção	
	TEMP	UR
0.0 - 0.1	+25	*0.75
0.1 - 0.5	+19	*0.83
0.6 - 0.9	+12	*0.92
0.9 - 1.0	+5	*1.00

EMC das camadas limites : (1.1), (1.2), (1.3)

$$EMC_{prm} = f(\text{temp}_{prm}, UR_{prm})$$

EMC_{prm} = conteúdo de umidade em equilíbrio calculado a partir da temperatura e umidade da interface atmosfera e combustível

Fuel: 10-horas

$$MC10 = A * C + B * C * (W_f - 100) \quad (I.9)$$

W_f = peso da madeira do combustível em gramas

$$A = 0.5 * AGE / 30.0 \quad (I.10)$$

A = variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente

AGE = número de dias de exposição da madeira no meio ambiente

$$BB = 1.0 + (0.02 * AGE / 30.0) \quad (I.11)$$

BB = variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente

$$CC = c \lim at / 4.0 \quad (I.12)$$

CC = variável intermediária de correção de dias de exposição da madeira no meio ambiente

$c \lim at$ = classes de clima adotado no modelo NFDRS

Se a madeira do combustível não é usada

$$MC10 = 1.28 * EMC_{prm} \quad (I.13)$$

Conteúdo da umidade do combustível de 10-h no final do período 1:

$$MC10P1 = YMC10 - (BNDRY1 - YMC10) * (1.0 - 1.1 * \exp(-1.6)) \quad (I.14)$$

$MC10P1$ = predição do conteúdo de umidade

$YMC10$ = valor inicial do conteúdo de umidade no passo de tempo de 10-horas para o cálculo de $MC10P1$.

Conteúdo de umidade do combustível de 10-h no final do período 2:

$$MC10P2 = MC10P1 - (BNDRY2 - MC10P1) * (1.0 - 0.87 * \exp(-0.8)) \quad (I.15)$$

$$MC10 = MC10P2$$

$MC10P2$ = predição do conteúdo de umidade para o dia seguinte

Valores de limite médio da umidade para os períodos de 1 e 2:

$$BNDRY1 = \frac{((16.0 - PDUR1) * EMC_{br1} + (2.7 * PDUR1 + 76.0) * PDUR1)}{16} \quad (I.16)$$

$$BNDRY_2 = \frac{((8.0 - PDUR2) * EMCbr2 + (2.7 * PDUR2 + 76) * PDUR2)}{8} \quad (I.17)$$

BNDRY1 = umidade das primeiras 16 horas no período de previsão de 24 horas. Aplicada para predizer o conteúdo de umidade no passo de tempo de 10-horas

PDUR1 = predição da duração da precipitação nas primeiras 16 horas no período de previsão de 24 horas

EMCbr1 = conteúdo da umidade de equilíbrio nas primeiras 16 horas no período de previsão de 24 horas

BNDRY 2 = umidade das últimas 8 horas no período de previsão de 24 horas. Aplicada para predizer o conteúdo de umidade no passo de tempo de 10-horas

PDUR2 = predição da duração da precipitação nas últimas 8 horas no período de previsão de 24 horas

EMCbr2 = conteúdo da umidade de equilíbrio nas últimas 16 horas no período de previsão de 24 horas

Fuel: 100-horas intervalo

$$MC100 = YMC100 + (BNDRYH - YMC100) * (1.0 - 0.87 * \exp(-0.24)) \quad (I.18)$$

$$YMC 100 = 5.0 + (5.0 * c \text{ lim } at) \quad (I.19)$$

MC100 = conteúdo de umidade da madeira do combustível no passo de tempo de 100-hora.

YMC100 = *MC100* valor calculado para predição do dia

Peso médio EMC para o período de 24-horas

$$BNDRYH = \frac{((24.0 - PDUR) * EMCbar + PDUR * (0.5 * PDUR + 41.0))}{24} \quad (I.20)$$

BNDRYH = condição de umidade no período de 24 horas

PDUR = duração da precipitação

Comprimento do dia

$$PHI = lat * 0.01745$$

$$Decl = 0.41008 * \sin((IDATE - 82) * 0.01745)$$

$$Daylit = 24 * \left(\frac{1 - a \cos(\tan(PHI) * \tan(decl))}{3.1416} \right)$$

PHI =estação de latitude

lat =latitude

$Decl$ = ângulo zenital solar diário

$IDATE$ = dia juliano do ano, 1 a 366, derivado do mês e dia

$Daylit$ = horas de luz do dia

Peso médio do EMC para período de 24-horas

$$EMCbar = \frac{(Daylit * EMC \text{ min} + (24.0 - Daylit) * EMC \text{ max})}{24} \quad (I.21)$$

$EMCbar = EMC$ considerando o peso de horas do dia e noite

Fuel: 1000-horas de intervalo

$$MC1000 = PM1000 + (BDYbar - PM1000) * (1.0 - 0.82 * \exp(-0.168)) \quad (I.22)$$

$MC1000$ = conteúdo de umidade da madeira do combustível no passo de tempo de 1000-horas

$PM1000$ = cálculo de $MC1000$ para previsão de 7 dias

Para 24 horas

$$BNDRYT = \frac{((24.0 - PPTDUR) * EMCbar + PPTDUR * (2.7 * PPTDUR + 76.0))}{24} \quad (I.23)$$

$BNDRYT$ = condição de umidade no período de 24 horas

Para 7 dias

$$BDYbar = \frac{(BNDRYT(1) + \dots + BNDRYT(7))}{7} \quad (I.24)$$

$BDYBAR$ = cálculo de $MC1000$ para 7 dias

Arranjo

$$MC1000(n) = 10.0 + (5.0 * c \text{ lim } at)$$

$$BNDRYH(n) = 10.0 + (5.0 * c \text{ lim } at)$$

⇒ **Modelo de umidade do combustível vivo**

Modelo de umidade do combustível herbáceo

Modelo para o estádio pregreen

$$MCherb = MC1 \quad (I.25)$$

Estádio greenup

$$MCherb = MChrbi \quad (I.26)$$

$$WIP = W1 + Wherb \quad (I.27)$$

$$X1000 = MC1000 \quad (I.28)$$

$$GRNDAY = 0$$

$$Mcherb = MChrbi + (MCHRBP - MCHRBI) * Gren \quad (I.29)$$

$$MCHRBP = HerbGA + HerbGB * X1000 \quad (I.30)$$

$$X1000 = YX1000 + (DIFF * Kwet * Ktemp) \quad (I.31)$$

$$DIFF = MC100 - YM1000 \quad (I.32)$$

$$Gren = \frac{GRNDAY}{(7.0 * c \lim at)} \quad (I.33)$$

MCherb = conteúdo de umidade no combustível herbáceo

MChrbi = cálculo do *MCherb* do dia anterior do estágio greenup

WIP = carregamento do combustível herbáceo para o período de 1-hora

W1 = carregamento do combustível herbáceo para o período de 1-hora específico para um modelo de combustível

Wherb = carregamento do combustível herbáceo do modelo de combustível

X1000 = variável independente do modelo de umidade do combustível herbáceo

GRNDAY = número de dias desde o início do estágio greenup

DIFF = mudança de 24 horas no *MC1000*

YM1000 = *MC1000* previsão do dia

YX1000 = *MC1000* previsão do dia

Kwet = fator de umidade

Ktemp = fator de temperatura

onde:

$$\text{Se } MC1000 > 25\% \quad Kwet = 1.0$$

$$\text{Se } MC1000 < 26\% \ \& \ > 9\% \quad Kwet = (0.0333 * MC1000 + 0.1675)$$

$$\text{Se } MC1000 < 10\% \quad Kwet = 0.5$$

$$\text{Se } DIFF \leq 0.0 \quad Kwet = 1.0$$

$$\text{Se } (tempmax + tempmin) / 2 \leq 50\% \quad Ktemp = 0.6 \quad \text{senão} \quad Ktemp = 1.0$$

Classe Climática NFDRS	HerbGA HerbGB	
	1	-70.0
2	-100.0	14.0
3	-137.5	15.5
4	-185.0	17.4

MCHRBP = conteúdo de umidade herbáceo potencial durante o estágio greenup
HerbGA = conteúdo de umidade herbáceo durante o estágio greenup ou quando *MCherb* é maior que 120 %
HerbGB = conteúdo de umidade herbáceo utilizado no estágio greenup ou quando *MCherb* é maior que 120 %

$$FCTCUR = 1.33 - 0.0111 * MCHERB$$

$$Wherbc = FCTCUR * Wherb$$

$$WIP = W1 + Wherbc$$

$$Wherbp = Wherb - Wherbc$$

Gren = fração do período de greenup que é calculado no *MCherb*
FCTCUR = fração do da transferencia do carregamento do combustível herbáceo do modelo do período de 1-hora
Wherbc = quantidade da transferencia do carregamento do combustível herbáceo do período de 1-hora
Wherbp = quantidade do carregamento do combustível herbáceo depois da transferencia do período de 1-hora

Estádio Green

$$Gren = 1.0$$

$$MCherb = herbGA + HerbGB * X1000 \quad (I.34)$$

O *MCherb* não pode exceder 250%

Estádio de transição

Anual

$$MCherb = ANNTA + ANNTB + X1000 \quad (I.35)$$

Perene

$$MCherb = PERTA + PERTB * X1000 \quad (I.36)$$

Classe de Clima	Anual		Perene	
	ANNTA	ANNTB	PERTA	PERTB
1	-150.5	18.4	11.2	7.4
2	-187.7	19.6	-10.3	8.3
3	-245.2	22.0	-42.7	9.8
4	-305.2	24.3	-93.5	12.2

ANNTA = parâmetro utilizado no período de transição para a vegetação anual

ANNTB = parâmetro utilizado no período de transição para a vegetação anual
PERTA = parâmetro utilizado no período de transição para a vegetação perene
PERTB = parâmetro utilizado no período de transição para a vegetação perene

Modelo de umidade do combustível lenhoso

Estádio Pregreen

$$MC_{wood} = PREGRN \quad (I.37)$$

Classe de clima	<i>PREGRN</i>
1	50
2	1.60
3	70
4	80

MC_{wood} = conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos
PREGRN = conteúdo de umidade da folhagem e madeira de arbustos na fase dormente

Estádio Greenup

$$MC_{wodl} = woodGA + woodGB * MC1000 \quad (I.38)$$

Classe de Clima	woodGA	woodGB
1	12.5	7.5
2	-5.0	8.2
3	-22.5	8.9
4	-45.0	9.8

woodGA = parâmetro utilizado no cálculo *MC_{wodp}* e *MC_{wood}*
woodGB = parâmetro utilizado no cálculo *MC_{wodp}* e *MC_{wood}*
MC_{wodp} = conteúdo de umidade potencial do combustível lenhoso durante o período greenup
MC_{wodl} = *MC_{wood}* do dia seguinte

Estádio Green

$$MC_{wood} = woodGA + woodGB * MC1000 \quad (I.39)$$

⇒ Sistema de componentes e índices

Carregamento do combustível vivo e morto para cada classe de perda de umidade

$$\text{(morto)} \quad WTOTD = W1P + W10 + W100 + W1000 \quad (\text{I.40})$$

$$\text{(vivo)} \quad WTOTL = Wherbp + Wwood \quad (\text{I.41})$$

$$WTOT = WTOTD + WTOTL \quad (\text{I.42})$$

$$\text{(1-hora)} \quad W1N = W1P * (10 - STD) \quad (\text{I.43})$$

$$\text{(10-hora)} \quad W10N = W10 * (1.0 - STD) \quad (\text{I.44})$$

$$\text{(100-hora)} \quad W100N = W100 * (1.0 - STD) \quad (\text{I.45})$$

$$\text{(herbácea)} \quad WherbN = Wherbp * (1.0 - STL) \quad (\text{I.46})$$

$$\text{(madeira)} \quad WwoodN = Wwood * (1.0 - STL) \quad (\text{I.47})$$

Onde:

$WTOTD$ = carregamento do combustível morto total

$W1P$ = carregamento do combustível da classe de 1-hora (específico do modelo de combustível)

$W10$ = carregamento do combustível da classe de 10-hora (específico do modelo de combustível)

$W100$ = carregamento do combustível da classe de 100-hora (específico do modelo de combustível)

$W1000$ = carregamento do combustível da classe de 1000-hora (específico do modelo de combustível)

$WTOTL$ = carregamento do combustível vivo total

$Wherbp$ = quantidade do carregamento depois da transferência p/o carregamento 1-hora

$W1N$ = carregamento do combustível de 1-hora

$W10N$ = carregamento do combustível de 10-hora

$W100N$ = carregamento do combustível de 100-hora

$WherbN$ = carregamento do combustível classe herbácea

$WwoodN$ = carregamento do combustível classe lenhosa

STD e STL = fração do combustível morto e vivo e minerais sem combustível = 0.0555

Densidade de massa do leito combustível

$$RHOBED = \frac{(WTOT - W1000)}{prof} \quad (\text{I.48})$$

RHOBED = densidade da massa do leito combustível
WTOT = carregamento do combustível total
prof = profundidade do leito combustível

Densidade do Combustível

$$RHOBAR = \frac{((WTOTL * RHOL) + (WTOTD * RHOD))}{WTOT} \quad (I.49)$$

RHOBAR = densidade da partícula do combustível
RHOL = densidade da partícula do combustível vivo
RHOD = densidade da partícula do combustível morto

RHOL e *RHOD* = 32lb/ft³

Taxa de Packing

$$BETBAR = \frac{RHOBED}{RHOBAR} \quad (I.50)$$

BETBAR = razão do packing
RHOBED = densidade de massa do leito combustível

Coefficiente mineral do combustível vivo e morto

$$\text{(morto)} \quad ETASD = 0.174 * SD^{(-0.19)} \quad (I.51)$$

$$ETASL = 0.174 * SD^{(-0.19)} \quad (I.52)$$

ETASD = coeficiente damping mineral do combustível morto
ETASL = coeficiente damping mineral do combustível vivo
SD = conteúdo mineral de sílica livre no combustível morto
SL = proporção do conteúdo mineral de sílica livre no combustível vivo

SD e *SL* = 0.01

Taxa do número de aquecimento do combustível vivo e morto

$$WRAT = \frac{(HN1 + HN10 + HN100)}{HNherb + HNwood} \quad (I.53)$$

WRAT = razão do número de aquecimento do combustível vivo-morto pelo o cálculo da unidade de extinção do combustível vivo
HN1 = número de aquecimento classe 1-hora
HN10 = número de aquecimento classe 10-hora

$HN100$ = número de aquecimento classe 100-hora
 $HNherb$ = número de aquecimento classe herbácea
 $HNwood$ = número de aquecimento classe lenhosa

Número de aquecimento para cada classe de combustível

(1-hora) $HN1 = W1N * \exp(-138.0/SG1)$ (I.54)

(10-horas) $HN10 = W10N * \exp(-138/SG10)$ (I.55)

(100-horas) $HN100 = W100N * \exp(-138/SG100)$ (I.56)

(herbáceo) $HNHerb = WherbN * \exp(-500.0/SGherb)$ (I.57)

(madeira) $HNwood = WwoodN * \exp(-500.0/SGwood)$ (I.58)

$SG1$ = razão da área da superfície pelo volume específico para o modelo de combustível e classe de 1-hora

$SG10$ = razão da área da superfície pelo volume específico para o modelo de combustível e classe de 10-hora

$SG100$ = razão da área da superfície pelo volume específico para o modelo de combustível e classe de 100-hora

$SGherb$ = razão da área da superfície pelo volume específico para o modelo de combustível e classe herbáceo

$SGwood$ = razão da área da superfície pelo volume específico para o modelo de combustível e classe lenhoso

$SG1, SG10, SG100, SGherb, SGwood$

Área da superfície pelo volume para cada classe de combustível

(morto) $SADeal = SA1 + SA10 + SA100$ (I.59)

(vivo) $SALive = SAHerb + SAWood$ (I.60)

(1-hora) $SA1 = \left(\frac{W1P}{RHOD} \right) * SG1$ (I.61)

(10-hora) $SA10 = \left(\frac{W10}{RHOD} \right) * SG10$ (I.62)

(100-hora) $SA100 = \left(\frac{W100}{RHOD} \right) * SG100$ (I.63)

$$\text{(herbáceo)} \quad SA_{Herb} = \left(\frac{W_{Herb}}{RHOD} \right) * SG_{Herb} \quad (I.64)$$

$$\text{(madeira)} \quad SA_{Wood} = \left(\frac{W_{Wood}}{RHOL} \right) * SG_{Wood} \quad (I.65)$$

SAD_{ead} = área de superfície da classe do combustível morto

SAL_{ive} = área de superfície da classe do combustível vivo

$SA1$ = área de superfície da classe do combustível 1-hora

$SA10$ = área de superfície da classe do combustível 10-hora

$SA100$ = área de superfície da classe do combustível 100-hora

SA_{Herb} = área de superfície da classe do combustível herbáceo

SA_{Wood} = área de superfície da classe do combustível lenhoso

Carregamento do peso do combustível morto e vivo

$$\text{(morto)} \quad W_{DeadN} = (F1 * W1N) + (F10 * W10N) + (F100 * W100N) \quad (I.66)$$

$$\text{(vivo)} \quad W_{LiveN} = (F_{Wood} * W_{WoodN}) + (F_{Herb} * W_{HerbN}) \quad (I.67)$$

W_{DeadN} = carregamento do combustível morto- peso da área de superfície

W_{LiveN} = carregamento do combustível vivo- peso da área de superfície

$F1$ = proporção da área de superfície do combustível morto da classe 1-hora, usando fator peso para o cálculo de R

$F10$ = proporção da área de superfície do combustível morto da classe 10-hora, usando fator peso para o cálculo de R

$F100$ = proporção da área de superfície do combustível morto da classe 100-hora, usando fator peso para o cálculo de R

F_{Wood} = proporção da área de superfície do combustível morto da classe lenhosa, usando fator peso para o cálculo de R

F_{Herb} = proporção da área de superfície do combustível morto da classe herbácea, usando fator peso para o cálculo de R

Fatores de peso para cada classe de combustível

$$\text{(1-hora)} \quad F1 = \frac{SA1}{SAD_{ead}} \quad (I.68)$$

$$\text{(10-hora)} \quad F10 = \frac{SA10}{SAD_{ead}} \quad (I.69)$$

$$\text{(100-hora)} \quad F100 = \frac{SA100}{SAD_{ead}} \quad (I.70)$$

$$\text{(herbáceo)} \quad F_{Herb} = \frac{SA_{Herb}}{SAL_{ive}} \quad (I.71)$$

$$\text{(lenhoso)} \quad F_{wood} = \frac{SA_{Wood}}{SA_{Live}} \quad (I.72)$$

Fatores de Peso para combustível vivo e morto

$$\text{(morto)} \quad F_{Dead} = \frac{SA_{Dead}}{(SA_{Dead} + SA_{Live})} \quad (I.73)$$

$$\text{(vivo)} \quad F_{Live} = \frac{SA_{Live}}{(SA_{Dead} + SA_{Live})} \quad (I.74)$$

F_{Dead} = proporção da área de superfície total da classe do combustível morto

F_{Live} = proporção da área de superfície total da classe do combustível vivo

SA_{Dead} = área de superfície da classe do combustível morto

SA_{Live} = área de superfície da classe do combustível vivo

Taxa da área da superfície pelo volume característico do combustível vivo e morto

$$\text{(morto)} \quad SGBRD = (F1 * SG1) + (F10 * SG10) + (F100 * SG100) \quad (I.75)$$

$$\text{(vivo)} \quad SGBRL = (F_{Herb} * SG_{Herb}) + (F_{Wood} * SG_{Wood}) \quad (I.76)$$

$SGBRD$ = característica da razão da área da superfície pelo volume do combustível morto-peso do carregamento

$SGBRL$ = característica da razão da área da superfície pelo volume do combustível vivo-peso do carregamento

Taxa de característica da área de superfície pelo volume

$$SGBRT = (F_{Dead} * SGBRD) + (F_{Live} * SGBRL) \quad (I.77)$$

$SGBRT$ = característica da razão da área da superfície pelo volume do leito combustível -peso do carregamento

Taxa packing

$$BETOP = 3.348 * SGBRT^{(-0.8189)} \quad (I.78)$$

$BETOP$ = razão packing ótimo- peso da área de superfície

Velocidade de reação máxima

$$GMAMX = \frac{(SGBRT^{1.5})}{495.0 + 0.0594 * SGBRT^{1.5}} \quad (I.79)$$

GMAMX = peso da velocidade de reação máxima da área de superfície

$$GMAOP = GMAMX * \left(\frac{BETBAR}{BETOP} \right)^{(AD)} * \exp \left(AD * \left(\frac{1.0 - BETRAR}{BETOP} \right) \right) \quad (I.80)$$

$$AD = 133.0 * SGBRT^{(-0.7913)} \quad (I.81)$$

GMAOP = peso da velocidade de reação ótima da área de superfície

BETRAR = razão packing

AD = velocidade de reação ótima

Taxa de fluxo de propagação sem vento

$$Zeta = \frac{\exp((0.792 + 0.681) * SGBRT^{(0.5)} * (BETBAR + 0.1))}{((192 + 0.2595) * SGBRT)} \quad (I.82)$$

Zeta = razão do fluxo de propagação sem vento usado no cálculo *ROS*

Peso do conteúdo de umidade do combustível morto referente à umidade de extinção do combustível-vivo

$$MCLFE = \frac{((MC1 * HN1) + (MC10 * HN10) + (MC100 * HN100))}{HN1 + HN10 + HN100} \quad (I.83)$$

Umidade extinta do combustível vivo

$$MXL = \left(\frac{2.9 * WRAT * (1.0 - MCLFE)}{MXD} \right) - 0.226 * 100 \quad (I.84)$$

WRAT = razão do número de aquecimento do combustível vivo – morto para o cálculo da umidade do comb. vivo de extinção

MXD = umidade de comb. morto de extinção específico para um modelo

Peso do conteúdo de umidade do combustível vivo e morto

$$(morto) WTMCD = (F1 * MC1) + (F10 * MC10) + (F100 * MC100) \quad (I.85)$$

$$\text{(vivo)} \quad WTMCL = (F_{Herb} * MCHerb) + (F_{Wood} * MCWood) \quad (I.86)$$

$WTMCD$ = peso do conteúdo de umidade do combustível morto por área de superfície

$WTMCL$ = peso do conteúdo de umidade do combustível vivo por área de superfície

Coefficiente damping de umidade do combustível vivo e morto

$$\text{(morto)} \quad (I.87)$$

$$ETAMD = 1.0 - 2.59 * DEDRT + 5.11 * DEDRT^{(2.0)} - 3.52 * DEDRT^{3.0}$$

$$\text{(vivo)} \quad ETAML = 1.0 - 2.59 * LIVRT + 5.11 * LIVRT^{2.0-3.52*LIVRT} \quad (I.88)$$

$$DEDRT = \left(\frac{WTMCD}{MXD} \right) \quad (I.89)$$

$$LIVRT = \left(\frac{WTMCL}{MXL} \right) \quad (I.90)$$

$DEDRT$ = é calculado para $ETAMD$

$LIVRT$ = é calculado para $ETAML$

Efeito do vento

$$PHIWND = UFACT * (WS * 88.0 * WNDFC)^B \quad (I.91)$$

$$B = 0.02526 * SGBRT^{0.54} \quad (I.92)$$

$$C = 7.47 * \exp(-0.133 * SGBRT)^{(0.55)} \quad (I.93)$$

$$E = 0.715 * \exp(-3.59 * 10.0^{(-4.0)*SGBRT}) \quad (I.94)$$

$$UFACT = C * (BETBAR/BETOP)^{(-E)} \quad (I.95)$$

$UFACT$ = parâmetro utilizado para o cálculo da determinação do efeito do vento

WS = velocidade do vento

$WNDFC$ = fator de redução do vento específico para um determinado modelo de combustível

B = expoente do efeito do vento

C = parâmetro utilizado para o cálculo da determinação do efeito do vento

E = expoente do efeito do vento

Efeito da declividade

$$SLPFCT = 5.275 * (\tan(\text{ângulo de declividade}))^{2.0} \quad (I.96)$$

Classe de declividade	de	ângulo	SLPFCT
1		12.67°	0.267
2		17.63°	0.533
3		24.23°	1.068
4		32.46°	2.134
5		41.99°	4.273

$$PHISLP = SLPFCT * BETBAR^{(-0.3)} \quad (I.97)$$

SLPFCT = coeficiente para o cálculo do efeito da declividade

Intensidade de reação

$$IR = GMAOP * ((WDeadN * HD * ETASD * ETAMD) + (WLiveN * HL * ETASL * ETAML)) \quad (I.98)$$

WDeadN = peso da área de superfície - carregamento do comb. morto

HD = calor do comb. morto na combustão específico para um determinado modelo de combustível

WLiveN = peso da área de superfície - carregamento do comb. vivo

HL = calor do comb. vivo na combustão específico para um determinado modelo de combustível

Parâmetro do modelo de combustível *HD* e *HL* (Btu/ib)

Fonte de Calor

$$HTSINK = RHOBED * \left(FDEAD * \left(F1 * \exp\left(\frac{-138}{SGI}\right) * (250 + 11.16 * MC1) \right) + F10 * \exp\left(\frac{-138}{SG10}\right) \right) \quad (I.99)$$

RHOBED = densidade de massa do leito combustível

FDEAD = proporção da área da superfície total na classe do combustível morto

Taxa de propagação (componente de propagação)

$$R = \frac{IR * ZETA * (1.0 + PHISLP + PHIWND)}{HTSINK} \quad (I.100)$$

Cálculo do componente de energia liberada (influência das classes de combustível no risco de incêndio)

Fatores de peso para cada classe de combustível

$$(1\text{-hora}) F1E = \frac{W1P}{WTOTD} \quad (\text{I.101})$$

$$(10\text{-hora}) F10E = \frac{W10}{WTOTD} \quad (\text{I.102})$$

$$(100\text{-hora}) F100E = \frac{W100}{WTOTD} \quad (\text{I.103})$$

$$(1000\text{-hora}) F1000E = \frac{W1000}{WTOTD} \quad (\text{I.104})$$

$$(\text{Herbáceo}) FHerbE = \frac{WHerbD}{WTOTL} \quad (\text{I.105})$$

$$(\text{Wood}) FWoodE = \frac{WWood}{WTOTL} \quad (\text{I.106})$$

Fator de peso do combustível vivo e morto

$$(\text{morto}) FDEADE = \frac{WTOTD}{WTOT} \quad (\text{I.107})$$

$$(\text{vivo}) FLiveE = \frac{WTOTL}{WTOT} \quad (\text{I.108})$$

Carregamento do combustível vivo e morto

$$(\text{morto}) WDEDNE = WTOTD * (1.0 - STD) \quad (\text{I.109})$$

$$(\text{vivo}) WLiveE = WTOTL * (1.0 - STL) \quad (\text{I.110})$$

Taxa da área de superfície pelo volume característico do comb. Vivo e morto

$$(\text{morto}) SGBRDE = (F1E * SGI) + (F10E * SG10) + (F100E * SG100) + (F1000E * SG1000) \quad (\text{I.111})$$

$$(\text{vivo}) SGBRLE = (FWOOD * SGWood) + (FHerb * SGHerb) \quad (\text{I.112})$$

Taxa da área de superfície pelo volume

$$SGBRTE = (FDEADE * SGBRDE) + (FLIVEE * SGBRLE) \quad (\text{I.113})$$

Taxa Packing ótimo

$$Betope = 3.348 * SGBRTE^{(-0.8189)} \quad (I.114)$$

Velocidade de reação máxima

$$GMAMXE = SGBRTE^{1.5} / (495.0 + 0.0594 * SGBRTE^{1.5}) \quad (I.115)$$

Velocidade de reação ótima

$$GMAOPE = GMAMXE * \left(\frac{BETBAR}{BETOPE} \right)^{ADE * \exp \left(ADE * \left(\frac{1.0 - Betbar}{Betope} \right) \right)} \quad (I.116)$$

$$ADE = 133.0 * SGBRTE^{(-0.7913)} \quad (I.117)$$

Conteúdo de umidade do combustível vivo e morto

$$\begin{aligned} & \text{(morto)} \quad WTCDE = (FIE * MC1) + (F10E * MC10) + (F100E * MC100) + (F1000E * MC1000) \quad (I.118) \end{aligned}$$

$$\text{(vivo)} \quad WTMCLE = (FWoodE * MCWood) + (FHerbE * MCHerb) \quad (I.119)$$

Coefficiente de umidade damping do combustível vivo e morto

$$\text{(morto)} \quad ETAMDE = 1.0 - 2.0 * DEDRTE + 1.5 * DEDRTE^{2.0} - 0.5 * DEDRTE^{3.0} \quad (I.120)$$

$$\text{(vivo)} \quad ETAMLE = 1.0 - 2.0 * LIVRTE + 1.5 * LIVRTE^{2.0} - 0.5 * LIVRTE^{3.0} \quad (I.121)$$

$$DEDRTE = \left(\frac{WTCDE}{MXD} \right) \quad (I.122)$$

$$LIVRTE = \left(\frac{WTMCLE}{MXL} \right) \quad (I.123)$$

$$ETAMDE \text{ e } ETMLE > 0$$

Intensidade de reação

$$IRE = GMAOPE * ((FDEADE * WDEDNE * HD * ETASD * ETAMDE) + (FLIVEE * WLIVNE * HL * ETASL)) \quad (I.124)$$

Tempo de resistência da frente da Chama

$$TAU = \frac{384}{SGBRT} \quad (I.125)$$

Componente de energia liberada (Intensidade da linha de fogo)

$$ERC = (0.04 * IRE * TAU) \quad (I.126)$$

Índice de queima

$$BI = (3.01 * SC * ERC)^{0.46} \quad (I.127)$$

$$I = IRE * \frac{D}{60}$$

$$D = ROS * TAU$$

$$R = SC$$

⇒ Modelos de ocorrência do incêndio

Componente de ignição

Fatores de escala

$$PNORM 1 = 0.00232$$

$$PNORM 2 = 0.99767$$

$$PNORM 3 = 0.0000185$$

Calor de ignição

$$QIGN = 144.5 - (0.266 * TMPPRM) - (0.00058 * TMPPRM^{2.0}) - (0.01 * TMPPRM * MCI) + (18.54 * (1.0 - \exp(-0.151 * MCI))) + 6.4 * MCI \quad (I.1248)$$

Cálculo Intermediário:

$$CHI = \frac{344.0 - QIGN}{10} \quad (I.129)$$

Probabilidade de ignição

$$c = \frac{3.6 * PNORM 3 - PNORM 1 * 100}{PNORM 2} \quad (I.130)$$

$$P(I) = (CHI)^c \quad (I.131)$$

Taxa de propagação normalizada

$$SCN = \frac{1000 * SC}{SCM} \quad (I.132)$$

Probabilidade da ocorrência do incêndio

$$P(F/I) = SCN^{(0.5)} \quad (I.133)$$

Componente de ignição

$$IC = IRND \left(0.10 * P(I) * P \left(\frac{F}{I} \right) \right) \quad (I.134)$$

Índice de ocorrência do incêndio de causa-humana

$$MCOI = IRND(0.01 * MRI * IC) \quad (I.135)$$

Índice de Resistência ao Fogo

$$IRF = 0.71 \sqrt{BI^2 + (LOI + MCOI)^2} \quad (I.136)$$

Anexo II

Descrição dos modelos de combustível adotado no FARSITE (ANDREW, 1986).

Modelo de comb.	Tipo	Carregamento do combustível (ton/acre)				Profundidade do leito do combustível	Umidade extinção (%)
		1hr	10hr	100hr	live		
Gramíneas							
1	Pequena 1ft grass	0.74	0.00	0.00	0.00	1.0	12
2	Timber (gramíneas e subosque)	2.00	1.00	0.50	0.50	1.0	15
3	Grande (>2.5ft)grass	3.01	0.00	0.00	0.00	2.5	25
Chaparral e Campos Arbustivos							
4	Chaparral (6ft)	5.01	4.01	2.00	5.01	6.00	20
5	Arbustos (2ft)	1.00	0.50		2.00	2.00	20
6	Dormant brush Hardwood slash	1.50	2.50	2.00	0.00	2.50	25
7	Southern rough	1.13	1.87	1.50	0.37	2.50	40
Litter Florestal							
8	Litter floresta fechada	1.50	1.00	2.50	0.00	0.2	30
9	Litter de folhosas	2.92	0.41	0.15	0.00	0.2	25
10	Timber (litter e subosque)	3.01	2.00	5.01	2.00	1.0	25
Slash							
11	Light logging slash	1.50	4.51	5.51	0.00	1.0	15
12	Medium logging slash	4.01	14.03	16.53	0.00	2.3	20
13	Heavy logging slash	7.01	23.04	28.05	0.00	3.0	25
0 98 99	Sem combustível						

Anexo III

Pseudocódigo da Simulação do Avanço da Frente de Incêndio Utilizado no FARSITE

Iniciar

Entrar com o passo de tempo (especificar data e tempo de simulação).

```
{ Para cada incêndio,  
  { Definir cada vértice (x, y) (ponto de ignição).  
    { Entrar com os dados das condições do ambiente do incêndio  
      (combustível, condições atmosféricas e topografia).  
      Calcular a umidade do combustível nas condições iniciais.  
      Calcular a orientação do ângulo no vértice (eq. 3.15).  
      Calcular o incêndio de superfície.  
      Se (cobertura da copa > 0)  
        Calcular o incêndio de copa.  
    }  
    Calcular a área e o perímetro.  
  }  
}
```

Material em ignição lançado, ignição, fusão de todos os incêndios.

Cálculo do incêndio de superfície

```
{ Calcular a taxa de avanço da propagação.  
  Calcular o vetor vento e declividade (eq. 3.23 a - 3.23b).  
  Calcular a dimensão elíptica usando vetor vento e declividade (eq. 3.25 – 3.27c).  
  Calcular a taxa de propagação através da aceleração do fogo (eq. 3.35).  
  Calcular a taxa de propagação média do incêndio.  
  Calcular a taxa de propagação diferencial (eq. 3.10 – 3.11).  
  Corrigir declividade (eq. 3.19 – 3.20).  
  Comparar a propagação do incêndio com resultado da distância  
  Se (a propagação do incêndio é truncada para o resultado da distância)  
    { Calcular a taxa máxima da propagação na aceleração (eq. 3.35 – 2.39).  
      Ajustar a propagação em relação à distância
```

Redução do tempo decorrido para efetuar o resultado da distância.

}

}

Finalizar