



PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

Dinaldo Barbosa da Silva Júnior

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS
E QUEIMADAS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A
RESERVA BIOLÓGICA DO LAGO PIRATUBA – AP**

Recife

2007

Dinaldo Barbosa da Silva Júnior

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS E
QUEIMADAS: Um Estudo de Caso Sobre a Reserva
Biológica do Lago Piratuba – AP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais.**

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Tecnologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Francisco Luiz dos Santos

Recife

2007

S586m

Silva Júnior, Dinaldo Barbosa

Modelagem Computacional de incêndios e queimadas:
um estudo de saci sobre a reserva biológica do Lago
Piratuba – AP / Dinaldo Barbosa Silva Júnior ; orientador
Francisco Luiz dos Santos, 2007

110 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de
Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Programa de Pós-graduação
em Desenvolvimento em Processos Ambientais, 2007.

1. Incêndio Florestais – Simulação por computador. 2.
Incêndio Florestais – Amazônia – Prevenção e controle.
I Título.

CDU 551.59

Dedicatória

A minha esposa Fabrícia e desde já a minha filha Júlia.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo. À minha família. À família Lima. Ao meu orientador Francisco Luiz dos Santos. Ao Deputado Estadual do Amapá Michel JK. Ao Cel. BM. Giovanni T. Maciel Filho. Ao grande amigo Antonio Carlos Evangelista. A Adilson e família. Ao amigo Everton. Ao Prof^o Carlos Augusto Sampaio Ribeiro da URPPE, pelas orientações iniciais na área específica de incêndio em floresta. Aos irmãos da Duque de Caxias. A Carlos Batista pelo importante apoio. Aos funcionários do CRIATRONICS. Aos funcionários da Universidade Católica, sobretudo, da secretaria do mestrado (Nicéia, Inácio, Carlos e Moacir), da PRAC (Prof^o. Jorge, Prof^o. Junot, Prof^o. Degislando, Prof^a Galba, Prof^o. Silvio, Nadjanara, Zaidiana, Cláudia e Letícia), a Biblioteca, ao Museu de Arqueologia (Prof^o. Albérico e a Prof^a. Olívia).

“Cada vida é um desenvolvimento psíquico que não se pode dominar a não ser parcialmente. Por conseguinte é muito difícil estabelecer um julgamento definitivo sobre si mesmo ou sobre a própria vida. Caso contrário, conheceríamos tudo sobre o assunto, o que é totalmente impossível”. (JUNG)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
SUMÁRIO	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
RESUMO	lx
ABSTRACT	X
RESUMÉ	xi
CAPÍTULO 1	12
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. PROBLEMAS AMBIENTAIS GLOBAIS	12
1.2. PROBLEMAS AMBIENTAIS NO BRASIL: O CASO AMAZÔNIA	13
1.3. O AMAPÁ INSERIDO NO CONTEXTO AMAZÔNICO	16
1.4. A RESERVA BIOLÓGICA DO LAGO PIRATUBA NO AMAPÁ	20
1.5. COMPORTAMENTO DO FOGO: ALGUMAS CONSIDERAÇÕES	23
1.6. O FOGO NA REBIO DO LAGO PIRATUBA	26
1.7. REFERÊNCIAS	28
CAPÍTULO 2	29
2. MODELO DE PROPAGAÇÃO DE FOGO EM FLORESTA COM CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS DE ÁRVORES	29
2.1. INTRODUÇÃO	29
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS	32
2.2.1. O FOGO	32
2.2.2. O MODELO	34
2.2.3. MODELAGEM DA FLORESTA	38
2.2.4. MODELAGEM DO FOCO CALOR	42
2.2.5. DINÂMICA DO MODELO PROPOSTO DE INCÊNDIOS EM FLORESTAS	44
2.2.5.1. Fatores externos relevantes na dinâmica da propagação do fogo	44
2.2.5.2. Aspectos relevantes da queima de uma única árvore, que influenciam na dinâmica da propagação do fogo	50

2.2.6. IMPLEMENTAÇÃO DE FERRAMENTAS DE MEDIDAS PARA A OBTENÇÃO DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	53
2.2.7. MEDIDA DA DIMENSÃO FRACTAL	65
2.2.8. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE QUE REÚNE O SIMULADOR DE INCÊNDIOS EM FLORESTAS E FERRAMENTAS DE MEDIDAS	72
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
2.3.1. A EVOLUÇÃO DE ÁREAS DEMARCADAS PELO FOGO	76
2.3.2. DIFERENTES TIPOS DE ÁRVORES	78
2.3.3. COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DE UM RAIOS DA REGIÃO INCENDIADA	80
2.3.4. FATORES DE ESCALA	81
2.3.5. EFEITO DO VENTO	81
2.3.6. CARACTERÍSTICA FRACTAL	84
2.3.6.1. Valores dos parâmetros estudados	85
2.4. CONCLUSÃO	88
2.5. REFERÊNCIAS	89
CAPÍTULO 3	90
3. ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE/PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS PELO MDPA – 1	90
3.1. MATERIAL E MÉTODOS	91
3.1.1. MODELAGEM DE ACEIROS	95
3.1.2. Modelagem da propagação do fogo em florestas utilizando imagens de satélite	96
3.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
3.2.1. Efeito dos aceiros na simulação	100
3.2.2. Simulação da propagação do fogo utilizando imagens de satélite	101
3.2.3. Aceiros em simulação com imagens de satélite	103
3.3. CONCLUSÃO	107
3.4. REFERÊNCIAS	108
4. CONCLUSÃO GERAL	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Distribuição mensal de focos de calor (Fonte: CPTEC/INPE/SEMA)	20
Figura 1.2	Localização geográfica da Reserva Biológica do Lago Piratuba – REBIO (Fonte: IBAMA).	21
Figura 1.3	Informações sobre limites e acesso a REBIO (Fonte: IBAMA).	22
Figura 1.4	Distribuição de focos de calor em áreas protegidas (Fonte: CPTEC/INPE/SEMA)	23
Figura 1.5	TRIÂNGULO DO FOGO: combustível+calor+ar (Fonte: PREVFOGO/IBAMA)	25
Figura 1.6	Foto de Fumaça de início de incêndio na REBIO (Fonte: Corpo de Bombeiros do Amapá).	26
Figura 1.7	Foto de um aceiro na REBIO (Fonte: Corpo de Bombeiros do Amapá).	27
Figura 2.1	Fase 1 – Pré-aquecimento. Ilustração de três momentos do pré-aquecimento. O primeiro é simplesmente o momento da aparição de uma fonte de calor que dever ter constância ou potência suficiente para alimentar toda essa fase.	37
Figura 2.2	Fase 2 – Fase gasosa ou combustão dos gases. Momento em que a árvore tem maior probabilidade de inflamar uma de suas vizinhas devido ao tamanho maior de suas chamas.	38
Figura 2.3	Fase 3 – Carbonização. O calor de cada chama deve ser alto, mas o valor aproximando da temperatura média ao redor da árvore carbonizada ou das cinzas é baixo, dando sinais de resfriamento.	39
Figura 2.4	Imagem do objeto existente no compilador C++ Builder 5.0 da Borland, cujas propriedades e métodos nos permitiram representar graficamente, não só o terreno, mas também as árvores nele inseridas.	40
Figura 2.5	Imagem do objeto “Vegetação” que representa a floresta modelada, dividido em quatro quadrantes.	63
Figura 2.6	Tela da interface do usuário do <i>software</i> com as ferramentas estatísticas. As imagens da simulação não são mostradas, apenas os valores médios e desvios padrão de cada parâmetro.	70
Figura 2.7	Imagem reduzida do software que simula incêndios em florestas.	74
Figura 2.8	Imagem dos objetos que definem características da simulação e valores de parâmetros.	75
Figura 2.9	Imagem do objeto onde será realizada a visualização da simulação, porém diferentemente do que se apresenta na figura 1, aqui podemos visualizar duas barras de rolagem que estão relacionadas	75

	com o efeito da ação e direção do vento.	
Figura 2.10	Imagem dos botões que compõem o <i>software</i> . Ao <i>click</i> simples, cada um executa um evento específico.	76
Figura 2.11	Caixa de seleção de gráficos a serem apresentados para o usuário através da seleção de uma das opções.	76
Figura 2.12	Local em que os gráficos serão apresentados.	76
Figura 2.13	Áreas modificadas pelo fogo (queimada ou em chamas) e área ainda não queimada (floresta verde)	77
Figura 2.14	Evolução das áreas ou números de árvores queimadas e em chamas.	78
Figura 2.15	Evolução do número de árvores queimadas e em chamas durante uma simulação. A exemplo do gráfico teórico, há um ponto onde os dois gráficos se encontram $A_q=A_f=A_c$.	79
Figura 2.16	Queda no número de árvores de cada tipo devido à destruição pelo fogo. O número de árvores de maior temperatura de ignição, representadas pela cor azul, cai mais lentamente.	80
Figura 2.17	Apresenta como se distribui a temperatura ao longo de um raio da região incendiada. Observa-se que o gráfico é lembra uma Gaussiana.	81
Figura 2.18	Alteração na forma da região incendiada causada pela ação do vento.	83
Figura 2.19	Imagem que ilustra alguns dos efeitos do vento não facilmente visualizados por nós, mas revelados pelo gráfico entre número de árvores em chamas (vermelho) e árvores queimadas (preto).	83
Figura 2.20	Imagem que ilustra alguns dos efeitos do vento não facilmente visualizados por nós, mas revelados pelo gráfico que apresenta como se distribui a temperatura ao longo de um raio da região incendiada.	84
Figura 2.21	Imagem do avanço do fogo em floresta apresentando características fractais.	85
Figura 2.22	Parte da interface gráfica da ferramenta estatística para análise de medidas obtidas com nosso modelo de propagação de florestas. Aqui observamos a dimensão fractal da imagem gerada por um incêndio simulado.	85
Figura 2.23	Resultado da ferramenta estatística para análise de medidas obtidas com as simulações. Aqui observamos a dimensão fractal da imagem gerada por um incêndio considerando-se a ação do vento.	86
Figura 2.24	Resultados obtidos pelo <i>software</i> que aplica métodos estatísticos sobre os valores dos parâmetros. À esquerda temos a média e à direita, o desvio padrão dos valores de cada parâmetro.	87
Figura 3.1	Parte da interface do software responsável pela inserção de aceiros.	98
Figura 3.2	Parte da floresta modelada em que podemos visualizar os aceiros inseridos pelo usuário.	99
Figura 3.3	Imagem de satélite de toda a reserva do Lago Piratuba	100

Figura 3.4	Imagem de satélite da região que foi percorrida pelo <i>software</i> . Essencialmente, árvores de dois tipos, cerrado e equatorial, parte do Lago do Piratuba e regiões de relevo sem vegetação.	101
Figura 3.5	Imagens de satélite original (à esquerda) e a mapeada (à direita). A cor amarela define a vegetação do tipo cerrado, a cor verde a vegetação do tipo equatorial amazônica e a cor preta qualquer ponto da floresta que não represente vegetação.	103
Figura 3.6	Comportamento do fogo diante da presença de um aceiro, representado por uma linha de cor oliva. Vemos que o fogo contorna o aceiro, e mantém sua geometria circular.	103
Figura 3.7	Propagação do fogo em regiões de tipo de vegetação diferentes: à esquerda temos uma região de cerrado, à direita temos uma região de floresta equatorial amazônica.	104
Figura 3.8	Diferentes estágios da evolução do fogo em uma região de transição entre florestas de dois tipos diferentes.	105
Figura 3.9	A REBIO funcionando como uma verdadeira barreira natural	106
Figura 3.10	Propagação do fogo em duas simulações diferente. Ambas apresentam a mesma configuração para todos os, parâmetros, porém na segunda, à direita, introduzimos um aceiro.	107
Figura 3.11	Imagem da região de floresta equatorial amazônica (1) que desejamos proteger dos incêndios originados no cerrado (2).	108
Figura 3.12	Imagem de aceiro que inserido para proteger o trecho da floresta equatorial amazônica considerado importante. Notemos que o aceiro liga duas regiões caracterizadas por serem barreiras naturais ao fogo.	108
Figura 3.13	Simulação de um incêndio iniciado na região de cerrado, sem a presença do aceiro.	109
Figura 3.14	Simulação de um incêndio iniciado na região de cerrado, com a presença do aceiro impedindo que o fogo progrida com facilidade para cima nas proximidades do lago.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Números dos focos de calor nos municípios do Amapá entre o ano de 2003 a 2005.	19
Tabela 3.1	Conteúdo de umidade do combustível vivo (folhagem)	95
Tabela 3.2	Restrições à somatória da FMA, de acordo com a precipitação do dia.	97
Tabela 3.3	Escala de perigo da fórmula Monte Alegre.	97

LISTA DE ABREVIATURAS

APA	Área de Proteção Ambiental
ARPA	Programa Áreas Protegidas da Amazônia
BIRD	Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento
CI	Conservação Internacional
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FUNBIO	Fundo Brasileiro para Biodiversidade
GEA	Governo do Estado do Amapá
GREENPEACE	<i>Greenpeace International</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEPA	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
MMA	Ministério do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e da Amazônia Legal
ONG	Organização Não-Governamental
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PREVFOGO	Sistema de Prevenção Nacional e Combate aos Incêndios Florestais
PROARCO	Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal
REBIO	Reserva Biológica
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SUDAM	Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia
UC	Unidade de Conservação
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

RESUMO

Motivados pela urgente necessidade de apoiar os estudos de estratégias, controle e combate a incêndios, principalmente em reservas florestais, desenvolvemos uma ferramenta computacional para auxiliar nessa tarefa. O nosso principal objetivo nesse trabalho foi elaborar um *software*, e realizar um primeiro estudo de caso, de simulação de incêndios na REBIO do Lago Piratuba – AP. O trabalho foi desenvolvido em três etapas: primeiro, criamos um modelo lógico e matemático baseado na dinâmica de reações e na termodinâmica da combustão de uma árvore; segundo, implementamos um programa computacional em linguagem utilizada pelos profissionais da área de computação para torná-lo mais acessível ou portátil; terceiro, realizamos um teste com imagens reais de satélite obtidas da REBIO do Lago Piratuba. Obtivemos imagens de incêndios simulados em florestas virtuais que demonstraram um alto grau de realismo ou semelhança com o que é observado em imagens reais. Também aplicamos o *software* em imagens reais da REBIO obtidas de satélite. Realizamos testes de propagação de incêndios nessas imagens sob a introdução de obstáculos naturais e artificiais para o fogo. Os resultados das imagens dinâmicas demonstram o efeito qualitativo esperado, mas a delimitação geométrica das áreas atingidas fica mais evidente com a observação precisa em escala no mapa, da extensão do fogo, e suas conseqüências, permitindo que parâmetros espaciais e temporais, úteis ao serviço de combate a incêndios, sejam medidos na simulação.

Palavras-Chave: 1. Incêndios 2. Sustentabilidade 3. Simulação computacional.
4. Amazônia

ABSTRACT

Motivated by urgent necessity to support the studies of strategies, controlling and combat to big fires, mainly in forest reserves, we develop a computational tool for assistance in this task. Our main goal in this work was to elaborate software, and to develop a first case study, that is fire simulation in the REBIO of the Lake Piratuba – AP. We reached this goal in three stages: first, we created a logical and mathematical model about tree combustion dynamics of reactions and the thermodynamics; second, we implement a computational program in a professional language for becomes it accessible or portable; third, we carry through a test with actual images of satellite of the REBIO of the Piratuba Lake. We got fire images simulated in virtual forests that demonstrated a high degree of realism or similarity that it is observed in real images. We also applied this software in satellite images of REBIO. The results of the dynamic images demonstrate the expected qualitative effect, but the geometric delimitation of the reached areas is more evident with the precise fire extension visualization, in the map scale, and its consequences, allowing that space and time, useful parameters to the fireman service, are measured in the simulation.

Keywords: 1. Fires 2. Sustentability 3. Computer Simulation 4. Amazon

RESUMÉ

Motivé par l'urgente nécessité d'appuyer les études de stratégies de contrôle et de combat à des incendies, principalement dans des réserves forestières, nous avons développé un outil computationnel pour aider, pour secondar l'essor de cette tâche. Notre principal but, objectif, dans ce travail, a été élaborer un software et accomplir un premier étude de cas de simulation d'incendies dans la REBIO du Lac Piratuba, i.e. Reserve Biologique du Lac Piratuba de L'état du Amapá. Nous avons accompli ce but, cet objectif dans trois étager: premièrement, nous avons créé nous avons développé un modèle logique, mathématique, fondé dans la dynamique de réactions et dans la thermodynamique de la combustion d'une arbre, deuxièmement, nous avons établi un programme computationnel pour le rendre plus accessible ou portable; troisièmement, nous avons accompli un test avec des images réelles de satellite, obtenues dans la RBIO do Lac Piratuba. Nous avons également obtenue des images d'incendies simulés dans des forêts virtuelles qui démonstrent un haut degré de réalisme ou ressemblance avec ce qui est observé dans des images réelles. Nous avons aussi relisé l'application du software dans des images réelles de la REBIO, obtenues par du satellite. Nous avons vérifié les possibilités d'emploi de software autant sous des obstacles naturels du type fleuves et lacs de même que dans la construction d'obstacles. Les résultats des images dynamique démonstrent l'effet qualitatif attendu, mais la délimitation géométrique des aires affectées rest plus évident avec la l'observation exacte en échelle dans le mappe de l'extension du feu et ses conséquences, en permettant paramètres spatiaux et temporels utiles au service de combat à des incendies, soient mesurés dans la simulations.

Mots-clés: 1. Incendies 2. Développement soutenable 3. Amazônia 4. Computation pour la simulation

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMAS AMBIENTAIS GLOBAIS

Cotidianamente, estão ocorrendo mudanças significativas no meio ambiente, exigindo análises e pesquisas científicas que minimizem os acidentes ambientais tais como chuvas ácidas, enchentes e incêndios. Não obstante, observa-se uma maior sensibilidade ecológica. A sensibilidade ecológica conheceu ao longo dos últimos anos uma expansão espetacular. O fenômeno é mundial, mas particularmente impressionante nos países ocidentais, convencidos da ameaça das catástrofes ecológicas, persuadidos dos perigos que pesam sobre o planeta e preocupados com o mundo que deixarão para as gerações futuras (ALPHANDÉRY, *et al* , 1992).

Acredita-se que a ecologia e as diversas discussões a seu respeito – natureza, meio ambiente, degradação ambiental e sustentabilidade ambiental – sejam um fenômeno mundial (TOZONI-REIS,2004). Existem muitas interpretações sobre seu conceito, mas é notório e quase unânime que o medo ecológico é um grande medo planetário. O grande medo ecológico cresce em terra fértil. Ele se alimenta da incessante descoberta de novos estragos do progresso. Ele se amplifica com ameaças ainda desconhecidas que pesam sobre nós – poluições invisíveis a nossa volta, riscos tecnológicos ocultos – e se expande em inúmeros cenários-catástrofes e profecias de apocalipse dos quais somos prevenidos de que não pertencem hoje exclusivamente ao terreno da ficção (ALPHANDÉRY, *et al* , 1992).

Nessa perspectiva, órgãos ambientais mundiais, preocupados com o avanço do nível de degradação ambiental e suas conseqüências imediatas aos habitantes da Terra, apontam para um caminho: a sustentabilidade ambiental. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em Estocolmo em 16 de junho 1972, e reafirmada no ECO 92, objetiva estabelecer parcerias entre os países, enfatizando a participação de órgãos públicos e privados, bem como dos indivíduos, na preservação da natureza, reconhecendo-a como “interdependente e integral a Terra” (AGENDA 21). Uma das tarefas dos órgãos ambientais é desenvolver a consciência dos indivíduos de interdependência em relação à Terra. Busca-se, através dessa ação, sensibilizar os habitantes sobre suas várias interferências desordenadas no planeta, bem como suas conseqüências. A busca de laços entre a pessoa e o planeta constitui também a preocupação central de um componente da sensibilidade ecológica (ALPHANDÉRY, *et al* ,

1992).Entretanto, se faz necessário definir e distinguir conceitualmente a ecologia das outras formas de análise ambiental, a exemplo do ecologismo.

Ecologia é a ciência que estuda a dinâmica e as relações entre os seres vivos, bem como dos seres vivos para com o meio ambiente. Ela teve seu início em 1866 pelo biólogo alemão Ernst Haeckel (ACOT, 1998). Na maioria das vezes essa ciência é desenvolvida nos centros universitários. Já o ecologismo surgiu na década de 1970 e está relacionado aos movimentos sociais, políticos e econômicos. São manifestações que questionam o esgotamento dos recursos naturais, as extinções de espécies, entre outros problemas acerca do meio ambiente. A exemplo, dos mais conhecidos, temos o Green Peace e a WWF (World Wild Foundation).

Comentários frequentes saltam aos olhos: “De onde viemos, para onde vamos”, “A Terra está em alerta”, “Vamos salvar as baleias”, são perguntas comuns do nosso dia-a-dia, que por vezes passam despercebidas, ou não temos interesse em atendê-las por que nosso maior problema está na sobrevivência imediata nesse mundo globalizado e capitalista. Talvez o maior problema esteja em compreender as dimensões reais da questão ambiental, do que simplesmente agir em prol dela. É difícil dar ênfase especial a essas questões em um país como Brasil que ocupa a posição 65º no ranking do IDH, que possui 58% de sua população sem acesso à água potável, diga-se de passagem, o pior da América Latina, e que possui uma taxa de 11,6% de analfabetismo (Fonte: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD). O desafio ambiental exige muito mais que uma atualização em áreas e materiais. Implica a aquisição de informação relativa a assuntos técnicos, que permita compreender o verdadeiro alcance dos problemas, ao mesmo tempo em que lhe confere certa capacidade de antecipação diante dos requisitos do momento histórico (DÍAZ, 2002).

1.2. PROBLEMAS AMBIENTAIS NO BRASIL: O CASO AMAZÔNIA

As ações danosas do homem ao meio ambiente é matéria de várias análises e divulgação na imprensa. No Brasil e no mundo os problemas mais evidentes podem ser exemplificados em algumas linhas relatadas em citações como:

A) Dimensão da degradação:

“Já são 61,3 milhões de quilômetros quadrados total de áreas degradadas em todo o mundo, segundo dados das Nações Unidas”.
(Agência de Notícias Brasil-Árabe – ANBA)

B) Impactos ambientais e pressões sociais:

Os impactos ambientais derivados da produção nacional de soja, carnes, ferro, alumínio etc. atuam em sinergia com as pressões sociais ou populacionais do atual mercado globalizado (...). O aumento da natalidade das populações de baixa renda e o deslocamento de parte da população da zona rural para as cidades levam à favelização de grandes áreas urbanas. (KLABIN, 2006).

C) Previsão por modelagem de cenários pessimistas:

A elaboração, por modelagem, de vários cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) indica um aumento na temperatura das regiões Sudeste e Centro-Oeste da ordem de 0,4 a 1,1°C em 2025, podendo chegar a 5° em 2080 (KLABIN, 2006).

D) Conscientização por relatos das conseqüências danosas:

O desmatamento altera os ciclos de água e de energia, induzindo um aumento na temperatura do ar e diminuição nas precipitações, podendo reduzir a quantidade de vapor d'água exportada para outras regiões. A fragmentação das áreas florestais diminui o número de habitats disponíveis para as espécies biológicas (KLABIN, 2006).

E) Fiscalização e risco de extinção:

Os 5% restantes da Mata Atlântica estão sob constante ameaça pelas atividades no seu entorno. O seu destino dependerá fortemente da capacidade de gerenciamento dos órgãos de controle ambiental (KLABIN, 2006).

F) Soluções:

Os resíduos sólidos (lixo e lodo de esgoto) no Brasil vêm aumentando, e já há problemas sérios em regiões metropolitanas para a construção de aterros como destino final. A solução desse problema é um desafio para as próximas décadas (KLABIN, 2006).

O Brasil, com suas dimensões continentais, lidera outro marco ambiental, que é possuir 40% de toda a área das florestas tropicais do mundo, representando à população brasileira uma grandiosa fonte de recursos naturais, sobretudo, porque gera renda para agricultores, comerciantes e, atualmente, multinacionais que industrializam os produtos naturais advindos da Floresta Amazônica. O setor florestal brasileiro representa aproximadamente 8% de toda riqueza anual do Brasil (BARRETO, *et al*, 2005). É inquestionável que o Brasil, sobretudo, a Amazônia, estão sob uma forte pressão quanto à exploração de seus recursos naturais. Prova dessa constatação pode ser observada nas citações relatadas no início deste texto. Em 2002, aproximadamente 47% da Amazônia brasileira estavam sob algum tipo de pressão humana, incluindo desmatamentos, bem como áreas sob pressão indicadas pela incidência de focos de calor (queimadas) em florestas. Sua grandiosidade desperta no Homem o seu valor inesgotável. Essa visão mascara um problema sem precedentes: dados da FAO (*Food and Agriculture Organization*) revelam que, de 2000 a 2005, o Brasil respondeu por 42% de perda florestal líquida global – da qual a maior parte ocorreu na Amazônia brasileira (BARRETO, *et al*, 2005).

Alguns autores definem pressão humana sob dois prismas: pressão humana consolidada e pressão humana incipiente. A pressão humana consolidada é a ocupação pelo homem de forma permanente e intensiva (assentamentos, desmatamentos e criação de zonas urbanas), quando isso ocorre, geralmente os impactos ambientais são irreversíveis. Já a pressão humana incipiente é representada por uma permanência humana temporária, como garimpagem, exploração e queima de madeira, entre outras. Esta última modalidade de pressão humana requer muita atenção. É o perigo mascarado. A ação do homem nessa proporção pode influenciar nas condições futuras da floresta. E, sobretudo, essa modalidade será parte do tema desta dissertação. Isto é, as conseqüências das queimadas descontroladas para a natureza, bem como, as zonas de influência de focos de calor e o surgimento de incêndios. BARRETO (2005) descreve que zonas de influência de focos de calor são definidas como áreas de atividade humana associada com incidência de focos de queimadas em florestas.

A pressão humana incipiente não é a responsável por toda degradação ambiental na Amazônia, porém é alarmante para algo transitório, por representar 28% dos casos. Mas, apesar dessas pressões que sofre a Amazônia, ela ainda conserva a maior diversidade de fauna e flora do mundo, ou seja, um complexo patrimônio natural, social e cultural. Ela detém 30% da biodiversidade biológica mundial e apresenta imenso potencial genético, princípios ativos de inestimável interesse econômico e social e oferta de produtos florestais com alto valor no mercado (Plano Amazônico Sustentável, 2006).

Pensando na preservação desses ecossistemas, o Governo Federal criou as Áreas de Conservação, comumente conhecidas como Unidades de Conservação – UCs. Essas possuem duas características: as de proteção integral e as de uso sustentável. A primeira é destinada a parques e reservas biológicas, entre outras. A segunda, como o próprio nome diz, tem a finalidade de garantir a sustentabilidade da região, isto é, permitir a exploração dos recursos naturais de forma moderada, garantindo às gerações futuras esse mesmo direito. Entre os vários setores ou recursos naturais protegidos temos as florestas, áreas de extrativismo e rios. A gerência também está dividida. Existem as unidades de conservação estaduais e federais. O nosso estudo de caso foi motivado pelo interesse na proteção da Unidade de Conservação Integral Federal Reserva Biológica do Lago Piratuba, localizada no Estado do Amapá. Esta última análise faz parte do escopo das políticas públicas ambientais mundiais das Nações Unidas, tendo em vista que boa parte dessas Unidades de Conservação são patrimônios naturais mundiais.

Reiterando, DIAS (2004) em sua dissertação de mestrado, intitulada “*Gestão participativa: uma alternativa de ecodesenvolvimento para a Reserva Biológica do Lago do Piratuba*”, discute a necessidade de preservar as Unidades de Conservação, argumentando que as áreas protegidas são um importante instrumento de políticas públicas para a preservação de seus recursos naturais, contudo, a conservação da biodiversidade parte de uma longa e ampla reflexão sobre o futuro da humanidade, garantindo os direitos das presentes e futuras gerações de terem acesso a ela.

1.3. O AMAPÁ INSERIDO NO CONTEXTO AMAZÔNICO

O Amapá chama a atenção pela sua complexa estrutura territorial, social, cultural e econômica. Um território maior do que o Estado da Paraíba, porém com apenas 16 municípios (PORTO, 2003). Uma sociedade com aproximadamente 405.304 habitantes (IBGE, 1999) e com um índice maior de crimes, contra a pessoa, e de apenados do que a mesma Paraíba, com mais de 2 milhões de habitantes (IBGE, 1999). Sua formação cultural, um tanto interessante e diversificada, é fruto de várias ondas migratórias nas décadas de 60, 70, 80 e, sobretudo, de 90.

O Amapá é consequência do desmembramento do Estado do Pará (QUEIROZ, 2001). Sua história institucional começa em 1943, com a criação do Território Federal, no então Governo do Presidente Getúlio Vargas (SANTOS, 1998). O objetivo dessa empreitada era ocupar as áreas fronteiriças e de baixa densidade demográfica (PORTO, 2003). Em 1988, com o estabelecimento da nova Constituição Federal, o Amapá, torna-se

um estado da federação. Dessa forma, ganha autonomia, como também, herda os problemas institucionais de um estado de um país de terceiro mundo. O Amapá é um Estado relativamente extenso, embora com apenas 16 municípios, tem uma grande cobertura vegetal e mineral, tornando-se, então, um grande atrativo para as multinacionais e os setores agroindustriais. O interesse pela exploração no Norte do Brasil, baseava-se na distribuição desigual das reservas manganíferas no espaço mundial, fazendo com que a produtividade amapaense, considerando sua posição geográfica próxima aos maiores centros consumidores, mais notadamente a América do Norte, detivesse grande valor político e econômico para as realidades regional e nacional, dando início, assim, a pesquisas para se avaliar o potencial da jazida. Verificada sua potencialidade, o Governo Brasileiro sancionou o Decreto-Lei n. 9.858, de 13/09/1946, que qualificava a jazida como reserva nacional. A instalação da Indústria e Comércio de Minérios Ltda. – ICOMI, marcou o início da produção industrial e extrativa mineral da Amazônia (PORTO, 2003).

Na década de 1990, com a promessa do surgimento de novos postos de trabalho, por causa da recém criação de um Estado, inicia uma onda migratória descomunal, que gera ainda mais problemas de habitação, saneamento e saúde. Com o inchaço populacional os problemas ambientais vêm a tona: rios desviados, incêndios, desmatamentos, extinção de espécies, emissão de gases poluentes etc. Nessa conjuntura, surgem as instituições reguladoras: Secretaria Estadual de Meio Ambiente – SEMA, Instituto de Estudos e Pesquisas do Amapá – IEPA e uma gerência do Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Essas instituições ajudaram o Amapá a organizar suas principais políticas ambientais, como também ajudaram na criação das reservas ambientais, que é matéria de nossa análise. A guisa desse projeto institucional foi reforçada pelo Programa de Desenvolvimento Sustentável do Amapá, na gestão do Governador João Alberto Capiberibe 1994-2002. O programa possui duas diretrizes gerais: maior agregação de valor aos produtos naturais do Estado e esforço para que a atividade econômica respeite a biodiversidade, evitando sua predação (PORTO, 2003). Por conta dessa atuação governamental, o Amapá é um dos Estados mais bem preservados da Amazônia: possui 69.485,80 Km² de áreas de conservação, correspondendo a 48,4% da área total do Estado. Acrescente-se a isso a demarcação de terras indígenas, 14.965,39 Km², representando 10,4% do Estado, totalizando 58,8% de área protegida (PORTO, 2003). No que se refere ao Estado do Amapá, é significativo o percentual de áreas protegidas, são 16 UCs. Desse total, 12 UCs foram decretadas pelo Poder Público Federal (DIAS, 2004).

Um dos maiores problemas ambientais do Amapá, principalmente nas Unidades de Conservação, são os incêndios e as queimadas florestais. As queimadas e os incêndios

podem levar a conseqüências de difícil reversão. O fogo na região Amazônica é encarado como um problema global, tendo em vista que suas conseqüências são notadas em toda Terra e sentidas em várias espécies da fauna e flora mundiais, notadamente em virtude da emissão CO (monóxido de carbono) e CO₂ (dióxido de carbono), advindos das queimadas e incêndios, que influenciam diretamente no aquecimento global. O autor NEPSTAD (1999), na obra *A floresta em chamas: origens, impactos e prevenção do fogo na Amazônia*, descreve um panorama de grande valia para entendermos o quão grave e complexo é o fogo na Amazônia. A cada ano, o fogo na Amazônia brasileira atinge uma área dez vezes o tamanho da Costa Rica. Quando fazendeiros e agricultores utilizam o fogo em suas terras para converter florestas em roças e pastagens e/ou para recuperar pastagens invadidas por ervas daninhas, inadvertidamente, queimam florestas, pastagens e plantações (NEPSTAD, 1999). Acredita-se, que os incêndios na Floresta Amazônica não são recentes. Data-se aproximadamente de 2 mil anos atrás com intervalos de 400 a 700 anos de intensidade nos incêndios. Embora, hoje, ocorra com maior freqüência por causa da ação humana.

Podemos classificar os tipos de fogo na floresta em relação ao tipo de ação humana e suas conseqüências. As *queimadas para desmatamento* são intencionais e estão associadas a derrubadas e à queima da floresta; os *incêndios florestais rasteiros* são provenientes de queimadas que escapam ao controle e invadem florestas primárias ou previamente exploradas para madeira e as *queimadas e os incêndios em áreas já desmatadas* são resultantes do fogo intencional ou acidental em pastagens, lavouras e capoeiras (NEPSTAD, 1999). Fazendo uma breve análise, identificamos que a primeira forma de fogo na Amazônia é mais danosa ecologicamente por que, além de emitir gases poluentes, destroem ecossistemas importantes, que na maioria das vezes não se recompõem. E no Amapá não seria diferente. O fogo advindo tanto das queimadas quanto dos incêndios é um grande problema para a natureza e para a sociedade. Além de a fumaça ser danosa à saúde, pode provocar fechamento de aeroportos, destruição de plantações e de espécies raras de fauna e flora.

Outro problema que está relacionado ao contexto do fogo, não só o da Amazônia, é a utilidade que ele tem na atividade agro-pastoril. A queima de algumas áreas ocorre como maneira de preparar o solo para plantação, em outro caso para a criação de gado e até para afastar pragas. É justamente nessas atividades que se encontra o perigo do fogo: o descontrole das queimadas gera os incêndios criminosos. Por que criminosos? Muitas ações desse tipo ocorrem porque alguns agricultores, sem autorização para explorar áreas protegidas, provocam focos de incêndios como conseqüência de queimadas. Em outros, querem ampliar suas posses, comumente conhecida como “grilagem”. Ainda, pode ocorrer

de forma acidental, quando quem manipula as queimadas não criminosas não tem as instruções necessárias. O fogo é tão útil que representa um componente inseparável da expansão das fronteiras agrícolas. A queimada é utilizada como método mais barato para fertilizar o solo de novas áreas agrícolas. O fogo converte as árvores abatidas no desmatamento em cinzas ricas em nutrientes que são incorporadas ao solo, além de limpar o terreno do emaranhado de troncos e galhos derrubados (NEPSTAD, 1999).

No caso da Amazônia, sobretudo no Amapá, quando ocorre esse descontrole nas queimadas, é praticamente impossível reverter a situação por conta da imensidão que é a biota amazônica. O Amapá sofre anualmente com as queimadas e os incêndios criminosos, principalmente nos período de julho a dezembro, pois é o momento de maior seca no norte do país. A seguir, destacaremos alguns dados em forma de tabela sobre foco de calor na região estudada, cedidos pela Secretaria do Meio Ambiente do Amapá – SEMA.

Tabela 1.1 Números dos focos de calor nos municípios do Amapá entre o ano de 2003 a 2005.

MUNICÍPIO	2003	2004	2005
Tartarugalzinho	974	1071	572
Macapá	724	633	243
Amapá	542	618	197
Cutias	485	199	129
Mazagão	250	833	189
Porto Grande	218	574	101
Oiapoque	204	952	396
Calçoene	172	1098	95
Pracuúba	209	247	76
Itaubal	165	343	166
Ferreira Gomes	108	253	113
Pedra Branca do Amaparí	87	213	46
Santana	77	268	86
Laranjal do Jarí	76	296	76
Vitória do Jarí	37	153	51
Serra do Navio	20	59	7
Total	4.348	7.810	2.543

Fonte: GUIMARÃES,2006.

A Tabela 1.1 descreve que o município de Tartarugalzinho lidera em número de focos de calor na maioria dos anos. Justamente nesse município está localizada a Reserva Biológica do Lago Piratuba, local de interesse para a aplicação do nosso estudo de caso para queimadas e incêndios. Pela Tabela 1.1, o ano de 2004 mostra-se, no geral, o de maior frequência em focos de calor, o que se repete em muitos casos específicos como o de Tartarugalzinho e, no caso gritante, o de Calçoene.

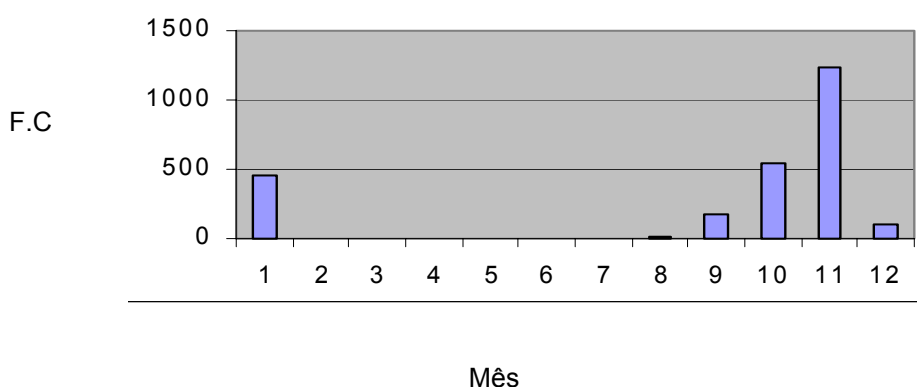


Figura 1.1: Distribuição mensal de focos de calor (Fonte: GUIMARÃES,2006)

Observa-se que a Tabela 1.1 aponta para o ano de 2004 como o de maior intensidade de focos de calor desde 2003. E a figura 1.1 desperta para os meses de maior secura que é a partir do segundo semestre. Daí, concluímos que esses pressupostos climáticos aliados às ações danosas do homem nos dão a receita certa para a maior parte das queimadas e os incêndios criminosos.

1.4. A RESERVA BIOLÓGICA DO LAGO PIRATUBA NO AMAPÁ

A Unidade de Conservação Federal do Lago Piratuba é tida como uma das mais importantes da Região Norte. Além de abrigar uma grande e diversificada quantidade de fauna e flora, ela serve de berço para a reprodução de aves migratórias e de quelônios.

Ela surgiu a partir do Decreto Federal nº 84.914, de 16 de julho de 1980, porém, só no Decreto Federal nº 89.932, de 10 de julho de 1984, ela tem em definitivo seus reais limites, bem como sua proteção integral, permitindo apenas visitas de cunho educacional

com prévia autorização do IBAMA. Já a sua nomenclatura advém do Lago existente no centro dessa reserva. A Reserva Biológica do Lago Piratuba é uma unidade de conservação de proteção integral, destinada à preservação integral da biota e demais atributos naturais existentes em seus limites, sem interferência humana direta ou modificações ambientais, executando-se as medidas de recuperação de seus ecossistemas alterados e as ações de manejo necessárias para recuperar e preservar o equilíbrio natural, a diversidade biológica e os processos ecológicos naturais (DIAS, 2004).

Sua localização fica no extremo leste do Estado, dentro dos municípios de Amapá e Tartarugalzinho, totalizando 357.000 ha. Faz fronteira com os municípios de Pracuúba e Cutias e limita-se ao norte com o rio Macarri. Ao leste é limitada pelo Oceano Atlântico, ao oeste com uma comunidade conhecida como Camaleão e ao sul com o Rio Araguari. Suas coordenadas geográficas são: latitudes de 01°10' N e 01°50' N e entre as longitudes 49°34'O e 50°34'O. (Fonte: IBAMA)

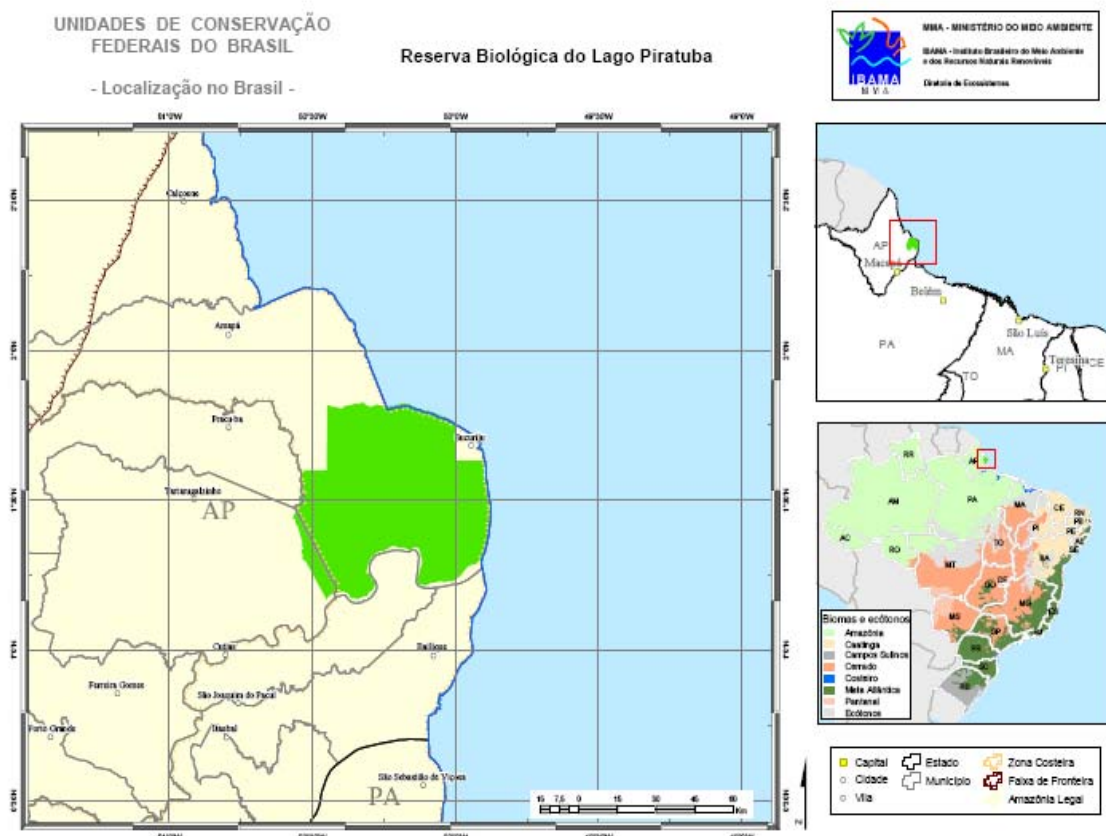


Figura 1.2: Localização geográfica da Reserva Biológica do Lago Piratuba – REBIO (Fonte: IBAMA).

Sua criação ocorreu devido à constatação de grande quantidade de floresta amazônica virgem como também de alta diversidade biológica, seguindo determinações de acordos internacionais, firmados pelo Brasil. Ainda, sua criação partiu da preocupação do *Governo Federal em resguardar a flora existente para as futuras pesquisas nos campos de várzea do baixo amazonas, além da proteção da fauna que vinha sendo extinta no litoral brasileiro.* (DIAS, 2004)

O acesso à Reserva Biológica do Lago Piratuba (REBIO) hoje é facilitado pela construção da BR-156, embora, ainda não seja confortável, pois só apenas os 150 primeiros quilômetros dessa rodovia, que tem como destino o município de Oiapoque, são asfaltados. Chegando ao município de Cutias do Araguari, é necessário pegar uma embarcação, que dura em média 3 horas. Na figura 1.5 temos mais algumas informações geográficas.

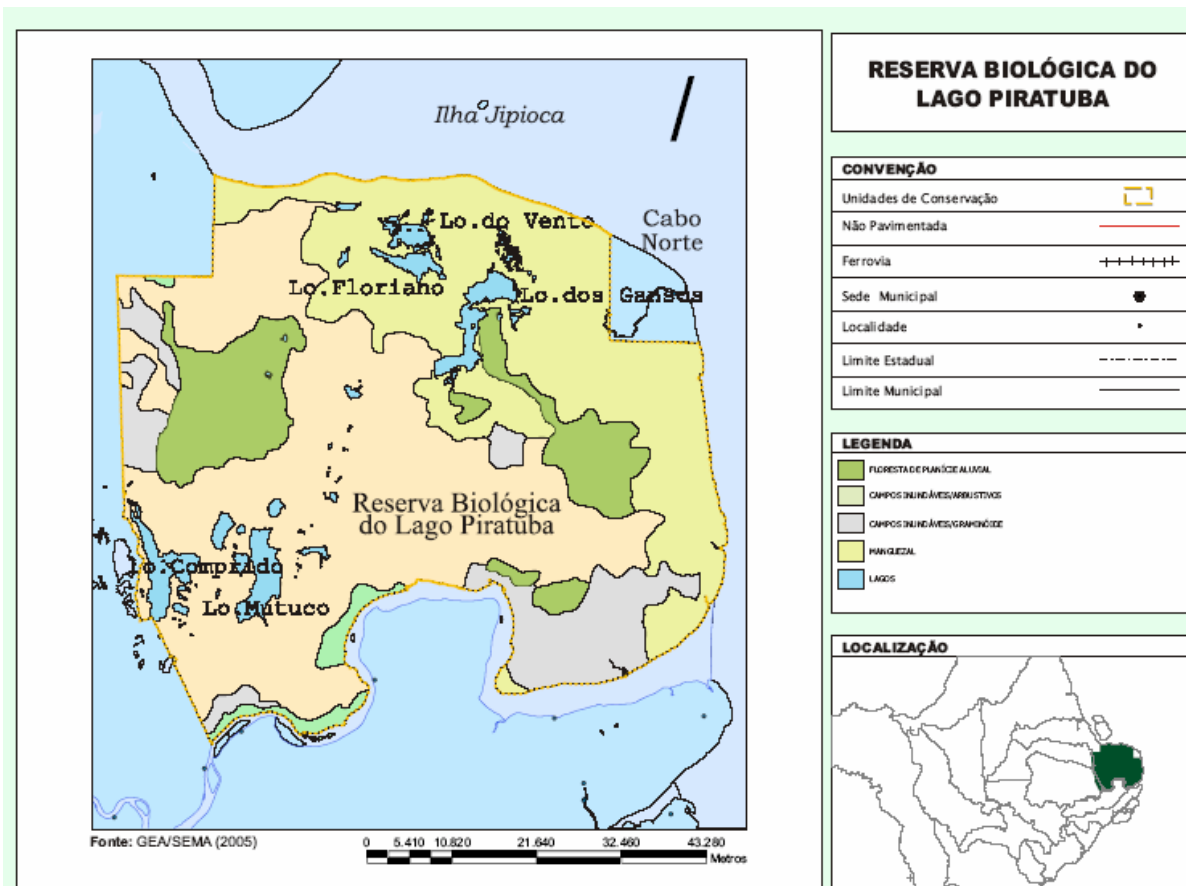


Figura 1.3: Informações sobre limites e acesso à REBIO (Fonte: IBAMA,2005).

Sua vegetação é bastante diversificada: mangue, cerrado, floresta amazônica e várzea. O seu clima segue o padrão amazônico, o tropical úmido. Os meses de setembro a dezembro são os de maior intensidade de focos de calor.

A temperatura alta é o que nos chama a atenção pelos problemas que podem surgir, principalmente ligados a incêndios, quando aliados a outros fatores, sobretudo ao homem.

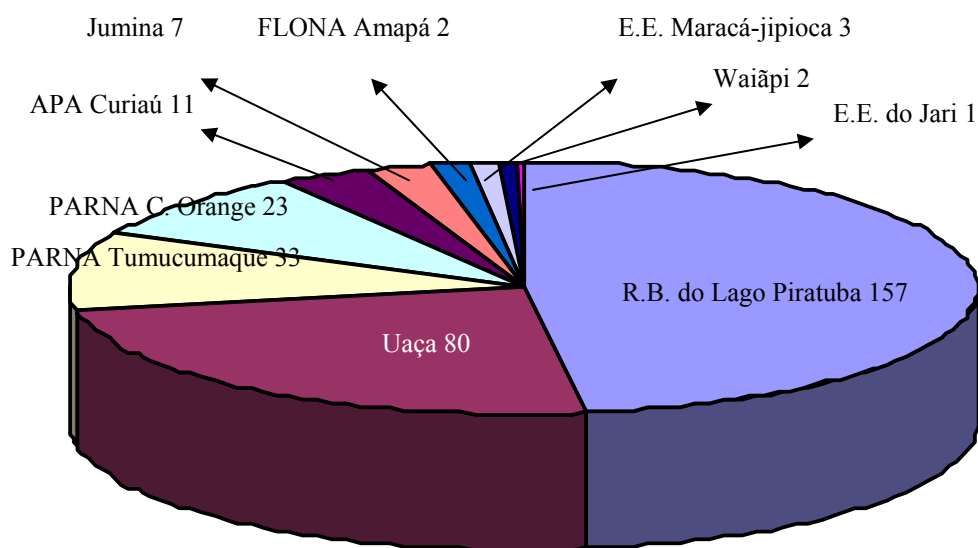


Figura 1.4: Distribuição de focos de calor em áreas protegidas (Fonte: GUIMARÃES,2006).

A figura 1.4, demonstra que a Reserva Biológica do Lago Piratuba é a mais atingida pelas queimadas, totalizando 49,21% dos focos de calor das áreas protegidas (Fonte: GUIMARÃES,2006). Essa situação de focos de calor, que possibilita queimadas e incêndios nas UCs, sobretudo na REBIO, nos direciona a apontar futuras medidas para preveni-la.

1.5. COMPORTAMENTO DO FOGO: ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

A REBIO do Lago Piratuba, com seu histórico de focos de calor e de incêndios criminosos, possui apresenta diversos tipos de propagação de fogo. O incêndio rasteiro transforma as florestas Amazônicas e provoca a morte de grande número de árvores, cipós, mudas e plantas herbáceas. Quando as árvores maiores morrem devido à ação do fogo,

estas se decompõem e caem ao chão, fazendo novas aberturas no dossel e adicionando mais combustível ao chão da floresta. O efeito do fogo mais importante é, por essa razão, o aumento da probabilidade de ocorrência de novos incêndios nos anos subseqüentes (NEPSTAD, 1999).

O registro do domínio do fogo é datado por volta de 4000 a.C., acompanhando o Homem nos principais momentos de sua vida. Indubitavelmente, o fogo é um marco no processo histórico do desenvolvimento do homem. Com o domínio dessa ferramenta, passamos a interferir no ambiente de forma mais dominadora e agressiva. O fogo é definido como a parte visual ou geradora de calor de uma reação altamente exotérmica em um determinado tipo de combustível e este, para desenvolver-se no processo, é necessário que esteja circundado de ar (BATISTA, 1990).

Baseado na literatura do IBAMA, principalmente do Sistema de Prevenção Nacional e Combate aos Incêndios Florestais – PREVFOGO, foi criado em 1989, pelo Decreto nº 97.635, sendo ratificado pelo Decreto nº 2.661 de 1998, um manual que dar instruções sobre o monitoramento, a prevenção e o controle de queimadas e incêndios florestais no Brasil. Aproveitamos parte dele, sobre a queima de árvores, para mostrar a seguir as fases do fogo.

1- FASE DE PRÉ-AQUECIMENTO: combustível frente a uma fonte de calor

COMBUSTÍVEL (vegetação) + CALOR (fogo) + a 100° C =

- Surgimento de VAPOR de água;
- Perda de umidade do combustível;
- Emissão de GASES;
- Não existem chamas.

2- FASE GASOSA: combustão dos gases

COMBUSTÍVEL (vegetação) + CALOR (fogo) + a 250-300° C =

- INIGNIÇÃO dos gases

COMBUSTÍVEL (vegetação) + CHAMAS + a 300-400° C =

- ponto de INFLAMAÇÃO

COMBUSTÍVEL (vegetação) + CHAMAS + a 600-1000° C =

- FUMAÇA E GASES NÃO QUEIMADOS COM VAPOR DE ÁGUA

3- FASE SÓLIDA: carbonização

CINZA RESIDUAL =

- A CHAMA É AZUL;
- FUMAÇA;
- QUEIMA-SE O COMBUSTÍVEL, FICANDO AS CINZAS RESIDUAIS.



Figura 1.5: TRIÂNGULO DO FOGO: combustível+calor+ar (Fonte: Silva,1998).

Nas operações de Manejo do Fogo costuma-se representar o processo de combustão por meio do conhecido Triângulo do Fogo. Neste, cada aresta tem um dos elementos do processo. O princípio básico do controle de incêndios florestais é impedir que o Triângulo se mantenha completo e para isso se pode atuar sobre quaisquer das arestas que o compõem (SILVA, 1998).

No que tange a emissão de carbono na atmosfera, os incêndios florestais queimam biomassa florestal, que quando chega ao grau de decomposição aumentam consideravelmente a incidência de carbono na atmosfera, acarretando na intensidade do aquecimento global. Além dos seus efeitos na inflamabilidade e no volume de carbono da floresta, o incêndio rasteiro muda dramaticamente a estrutura da vegetação florestal (NEPSTAD, 1999).

O fogo associado aos incêndios florestais apresenta-se como o principal elemento da diminuição das florestas nativas em todo mundo. Entretanto, “o fogo em si não é bom nem ruim, é apenas um instrumento a nossa disposição. Usá-lo é uma questão de inteligência” (SILVA, 1998).

1.6. O FOGO NA REBIO DO LAGO PIRATUBA

Os incêndios florestais ocorrem de forma diversificada na região Amazônica. No caso dessa REBIO, ocorrendo em menor proporção, existe outra modalidade de incêndio: o subterrâneo. O fato de ser subterrâneo representa uma dificuldade que na maioria das vezes causam danos de grande intensidade. São incêndios que se propagam debaixo da superfície terrestre, alimentados por matéria orgânica seca, raízes turfas – matérias finas, bem compactadas, de combustão lenta e contínua, se multiplicam com maior rapidez devido à presença de maior quantidade de oxigênio na combustão do material, este tipo de incêndio se espalha lentamente (SILVA, 1998). No entanto, não ocupa importância significativa, pois, são de difícil ocorrência, e quando ocorrem podem ser rapidamente controlados pelos *aceiros*. Esta técnica de controle de incêndios será discutida a *posteriori*.



Figura 1.6 Foto de fumaça de início de incêndio na REBIO (Fonte: Corpo de Bombeiros do Amapá).



Figura 1.7: Foto de um aceiro na REBIO (Fonte: Corpo de Bombeiros do Amapá).

Na figura 1.7 temos uma das formas de combater o avanço desse tipo de incêndio: o *aceiro*. O aceiro é uma “barreira natural ou construída, destinada a causar descontinuidade do material combustível” (SILVA, 1998).

Nesta parte, entende-se que o fogo na modalidade de incêndios é algo que ocorre sem controle sobre qualquer vegetação. E que seu comportamento se processa de acordo com o ambiente. Embora, sabendo-se que os fatores externos são decisivos para o início e propagação de qualquer tipo de incêndio. Sendo assim, as ações prévias de monitoramento podem ser uma ferramenta de grande utilidade na diminuição dos desastres ambientais.

1.7. REFERÊNCIAS

- ACOT, Pascal. **The European origins of scientific ecology**. Amsterdã: Gordon and Breach Publishers, 1998.
- ALPHANDÉRY, Pierre; BITOUN, Pierre; DUPONT, Yves. **O equívoco ecológico: riscos políticos**. São Paulo: Brasiliense, 1992.
- BARRETO, Paulo; SOUZA, Carlos; NOGUERÓN, Ruth. **Pressão humana na floresta amazônica brasileira**. Belém: WRI-Imazon, 2005.
- BATISTA, Antonio C.. **Incêndios florestais**. Recife/UFRPE, 1990.
- BRASIL. Plano Amazônia Sustentável. 2006
- COSTA, Marcos R. Nunes. **Manual para normatização de trabalhos acadêmicos: monografias, dissertação e teses**. Recife: INSAF, 2005.
- DÍAZ, Alberto P.. **Educação Ambiental como projeto**. Artmed. Porto Alegre, 2002.
- DIAS, Teresa Cristina. **Gestão participativa: uma alternativa de codesenvolvimento para a Reserva Biológica do Lago do Piratuba**. 2004. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental). Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA-BRASIL)**. Alternativas para prática das queimadas na agricultura: recomendações tecnológicas. Brasília, 2000.
- GUIMARÃES, Salatiel; VIDAL, Maria. **Relatório de focos de calor do estado do Amapá em 2005**. Macapá: SEMA, 2006.
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA-BRASIL). Atlas das Unidades de Conservação do Estado do Amapá (CD-Rom). Macapá, 2005.
- KLABIN, Israel. O CRESCIMENTO POPULACIONAL E A DEMANDA DE BENS E SERVIÇOS. IN: Temas ambientais relevantes. DOSSIÊ BRASIL: O PAÍS NO FUTURO. **Estudos Avançados**. vol.20 no.56 São Paulo Jan./Apr. 2006.
- NEPSTAD, Daniel et al. **Floresta em chamas: origem, impactos e prevenção do fogo na Amazônia**. Brasília, 1999.
- PORTO, Jadson. **Amapá: principais transformações econômicas e institucionais – 1943 a 2000**. Macapá: SETEC, 2003.
- QUEIROZ, Jonas Marçal. **Amazônia: modernização e conflito (séculos XVIII e XIX)**. Belém: UFPA/NAEA, 2001.
- SANTOS, Fernando. **História do Amapá: da autonomia territorial ao fim do jananismo 1943-1970**. Macapá: FUNDECAP, 1998.
- SILVA, Romildo G. **Manual de prevenção e combate de incêndios florestais**. Brasília: IBAMA, 1998.
- TOZONI-REIS, Marília Freitas. **Educação ambiental: natureza, razão e história**. Campinas: Autores Associados, 2004.

CAPÍTULO 2

MODELO DE PROPAGAÇÃO DE FOGO EM FLORESTA

2.1. INTRODUÇÃO

Embora o fogo, ao longo dos séculos, tenha ocupado uma função importante no desenvolvimento da sociedade global, atualmente, a sua utilização é preocupante e, no mínimo, contraditória em algumas situações. As queimadas bem controladas transformaram-se em uma ferramenta de gerência importante em regiões agrícolas (BERJAK, 2002;HEARNE,2002). Sua utilização para o melhoramento da agricultura, bem como, no próprio combate a incêndios, tem levado a uma discussão de importância gradativa e cuidado permanente, sobretudo, quando o que está em jogo são os recursos naturais não renováveis. Nesta linha, o fogo é também um fato dominante na história das florestas do mundo. Os incêndios florestais, originados do uso inadequado ou do descuido no manuseio do fogo, têm provocado inúmeros danos aos recursos florestais e ao meio ambiente como um todo (BATISTA, 1990). Os problemas ambientais ocasionados pelo fogo modificam a dinâmica do globo no controle da incidência de raios solares que provocam, em determinadas regiões, incêndios sem controle, gerando dessa forma um “efeito dominó”. Muito embora o fogo tenha sua existência independente do desenvolvimento da humanidade – raios, lavas vulcânicas, entre outros – atualmente tornam-se cada vez mais visíveis a participação e a ação danosa do homem na natureza, principalmente nos incêndios criminosos. Chama-se a atenção que, intencionalmente ou não, o fogo configura-se hoje como um problema de proporções mundiais, contribuindo fortemente para o aquecimento global, mesmo tendo sua importância em algumas comunidades como mecanismo para controle agrícola, a exemplo de comunidades da Savana Africana (BERJAK, 2002;HEARNE,2002).

Nesta perspectiva, visando à necessidade de uma ferramenta para visualização de incêndios florestais simulados, estamos propondo a modelagem computacional como alternativa para apoiar o estudo e a definição de estratégias para a prevenção de desastres ecológicos que envolvam o fogo em um conjunto de árvores circunvizinhas, tendo a floresta como o exemplo mais comum. Mas o que seria um modelo de simulação computacional?

Qual a importância de tal modelo para fenômenos ambientais? Vários estudos, pesquisas e desenvolvimento de novos métodos têm apresentado o uso de novas técnicas, sobretudo computacionais, para a implementação de modelos matemáticos com inspirações em algumas áreas da ciência, como a física e a biologia, para reproduzir artificialmente os fenômenos naturais, como o fogo em florestas (GOULD, 1996).

A simulação computacional com base em algoritmos ou modelos semi-empíricos está presente nas mais diversas áreas da ciência. Hoje é uma das mais importantes ferramentas na antecipação de resultados, ou ainda, na extração de dados comportamentais de ambientes ou de experiências com elevado grau de complexidade ou acessibilidade. Toda a simulação computacional é baseada em um modelo teórico ou experimental que possa dar origem a um algoritmo ou ser programável através do computador. A essência de um modelo é a representação simplificada de alguns objetos do mundo real, de uma situação física ou outra proposta particular, e talvez limitada, da realidade (WOOLFSON, 1999; PERT, 1999).

A modelagem por simulação computacional é uma das ferramentas mais eficazes para o estudo das relações entre o fogo, o clima e a vegetação (KEANE, 2004). Outro elemento que nos incentiva a utilizar os modelos computacionais para simular processos físicos, como o fogo, é a complexidade envolvida nos parâmetros de incêndios e queimadas, isto é, combustão, propagação e permanência das chamas. Os sistemas físicos que queremos estudar são muito complexos, contendo uma grande diversidade de parâmetros e variáveis detalhados e misturados de tal forma que não podemos ver nem a existência de todos nem todas as propriedades que podemos inferir (WOOLFSON, 1999; PERT, 1999). Então, por que integrar modelos computacionais aos modelos ambientais? Porque é desejável complementar a experiência de campo com as simulações de computador com o objetivo de se prevenir contra incêndios ou decidir, por exemplo, onde e quando uma ação de combate a incêndios deve ser iniciada ou que extensão de dano um foco de incêndio pode atingir depois de um tempo estipulado de evolução do fogo.

Um dos desafios mais difíceis em prever mudanças ecológicas em grande escala é o seu comportamento governado por dinâmicas de não equilíbrio, distúrbio em regimes não-lineares, eventos extremos e as relações espaciais complexas dentro dos modelos de simulação ecológica (KEANE, 2004). Os sistemas ambientais, principalmente estudados do ponto de vista físico, são extremamente complexos, com muitos elementos de interação que interferem em seu comportamento (WOOLFSON, 1999; PERT, 1999). No entanto, temos duas formas de simular computacionalmente incêndios: modelos vetoriais e modelos de autômatos celulares. Os modelos de autômatos celulares foram originalmente elaborados

para simulação de sistemas ponto a ponto, por isso são muito utilizados em imagens de mapa de bits, em que a configuração do sistema se dá sem que cada ponto tenha intrinsecamente a informação matemática da composição geométrica que forma com os outros. Como exemplo de imagem, citamos uma figura gravada como mapa de pixels que será modificada pela passagem de uma perturbação. Cada pixel pode ser alterado apenas nas coordenadas de localização e na cor. Após a modificação dos pixels, independentemente um do outro, temos a nova imagem modificada. Nos modelos vetoriais, a informação visual das imagens de propagação da perturbação obedece a equações matemáticas ou formas geométricas bem definidas, nas quais atuam as variáveis externas para modificar a figura. Nesse caso as informações sobre o formato geométrico das grandes perturbações que se espalham no sistema são bem conhecidas. Cada ponto é traçado a partir de uma equação que define a forma da perturbação em toda a figura. Por exemplo, em uma figura vetorial em que a perturbação produza efeitos circulares, o formato dessa perturbação é guardado apenas pelas informações das coordenadas do centro do círculo, o tamanho do raio e a cor, ao invés das informações detalhadas sobre todos os pixels (BERJAK, 2002; HEARNE, 2002).

Escolhemos o modelo de autômato celular como a melhor forma de representar nosso objeto de estudo ou sistema ambiental, que é uma floresta. Tendo em vista suas características, os modelos de autômatos celulares (CA) para o estudo da propagação do fogo tratam a floresta como uma matriz e o fogo como uma perturbação ou estado de cada elemento da matriz que pode contaminar os seus vizinhos. Dentro desses sistemas computacionais é possível estudar efeitos de distâncias entre pontos e tempo de chegada do fogo de um ponto a outro. É possível adicionar várias variáveis ao modelo para torná-lo mais rico ou realista, como: vento, umidade, tipo de combustível ou madeira da árvore, entre outras (BERJAK, 2002; HEARNE, 2002).

O nosso objetivo com este trabalho é modelar e implementar um software para simular computacionalmente incêndios e queimadas a partir de características individuais das árvores, como: quantidade de madeira a ser queimada ou tempo de queima de cada árvore, temperatura necessária para iniciar a combustão daquele tipo de madeira e temperatura média do local onde a árvore está situada. O algoritmo baseado em autômato celular também leva em conta as variáveis inerentes ao ambiente da floresta, tratado como uma matriz bidimensional de árvores. Dessa forma vamos tentar nos aproximar ao máximo de um sistema natural desse tipo, porém com o mínimo de complexidade e variáveis a serem controladas possíveis. No processo de medida dos parâmetros resultantes, as principais características a serem analisadas são baseadas na geometria euclidiana e fractal

do avanço do fogo, cuja descrição está na seção: 2.3.6. Característica fractal. São estudados tanto o comportamento estático como o dinâmico, a exemplo da velocidade (com suas características vetoriais) de propagação do fogo, embora o autômato se desenvolva em uma matriz de pixels. Procuraremos aprender e testar a evolução de incêndios e queimadas sem de fato destruir uma única árvore da natureza, no máximo consumindo algum papel de celulose para imprimir alguns resultados, o que procuramos fazer também com o máximo de economia.

Descreveremos primeiro a modelagem que foi realizada para as árvores e para a floresta. Em seguida serão apresentadas as técnicas e ferramentas computacionais para a implementação do modelo, em material e métodos. Depois serão apresentados e discutidos os resultados, primeiro procurando mostrar a plausibilidade com o sistema real e, segundo, qual o comportamento do fogo a luz de parâmetros da floresta entre área queimada, fogo e área virgem. Finalmente são apresentadas as conclusões.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem partiu do conhecimento de aspectos gerais do fogo, da queima da madeira e da transmissão do fogo entre árvores numa floresta. Seguimos alguns passos da argumentação para o estabelecimento do modelo e depois para a implementação.

2.2.1. O FOGO

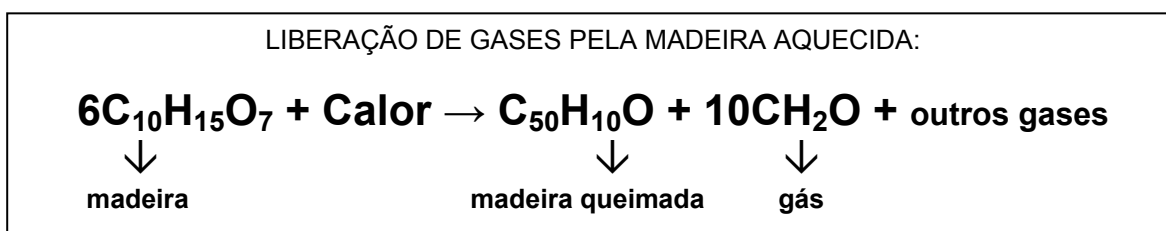
Normalmente o fogo surge de uma reação química entre o oxigênio, presente na atmosfera, e algum tipo de combustível (madeira, álcool ou gasolina, por exemplo). Obviamente, a madeira e a gasolina não pegam fogo espontaneamente só porque estão cercados de oxigênio. Para que a reação de combustão ocorra, é necessário aquecer o combustível até sua temperatura de ignição, a partir da qual o fogo torna-se auto-sustentável enquanto há combustível e oxigênio para a reação.

Muitos combustíveis queimam em uma etapa, como a gasolina. O calor vaporiza a gasolina e essa queima como gás volátil. Não há carvão. A queima de substâncias como álcool é ainda mais simples, se dá sob a reação de único tipo de molécula de combustível, enquanto a gasolina é uma mistura de alguns tipos de moléculas de hidrocarbonetos, mesmo com pouca variação, dependendo da origem entre fontes e fornecedores. Dessa maneira, o fogo

de cada combustível se comporta de um modo peculiar. Os especialistas podem ter uma idéia de como um fogo iniciou observando o modo como afetou as áreas ao redor. O fogo de um combustível de combustão rápida, que produza muito calor, provocará um tipo de dano diferente do que um fogo de combustão lenta.

A queima da madeira e de outros materiais complexos, do ponto de vista molecular, ocorre em várias etapas de definição não muito precisa. A seqüência de eventos na evolução do fogo sobre madeira pode ser descrita de forma geral nos itens abaixo:

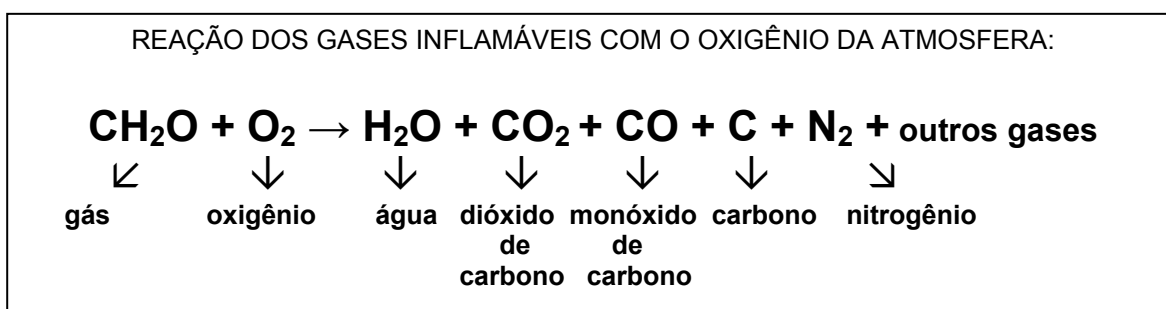
1. Fonte inicial de calor – o calor pode vir de diferentes origens: um fósforo, um foco de luz, fricção, relâmpago ou outro material que já esteja queimando;
2. Aquecimento – quando a madeira atinge aproximadamente 150°C, o calor decompõe parte do material de celulose que constitui a madeira, expulsando principalmente a água, como uma das primeiras substâncias a serem liberadas;
3. O início da queima da madeira – ocorre quando os gases voláteis estão quentes o suficiente (cerca de 260°C) para quebrarem as moléculas constituintes em átomos que se recombinaem com o oxigênio para formar água, dióxido de carbono e outros produtos. Em outras palavras, eles queimam. Parte do material decomposto é liberada na forma de gases voláteis ou fumaça. A fumaça é composta essencialmente de hidrogênio, carbono e oxigênio, combinados em várias moléculas, tendo o gás carbônico (dióxido de carbono) como uma das mais abundantes;



(KENT, 2003; WAMPLER, 2006; BRANDON, 2005)

4. A auto-sustentação do fogo – um efeito secundário dessas reações químicas (exógenas) é a geração de muito calor. O fato de essas reações químicas gerarem bastante calor é o que mantém o fogo aceso. O carbono do carvão também se combina com o oxigênio, que é uma reação muito mais lenta. É por isso que o fogo feito só com carvão vegetal pode continuar quente por bastante tempo. À medida que se aquecem, os átomos de carbono que estão subindo (assim como os átomos de outros materiais) emitem luz. Esse efeito de "luz produzida pelo calor" é chamado de incandescência e seu mecanismo fundamental é do tipo que cria a luz em uma lâmpada, tendo sua origem na emissão de fótons pelas promoções e quedas nos

níveis de energia dos elétrons. É o que causa a chama visível. A cor da chama varia dependendo da temperatura e do material que você está queimando. A variação de cores dentro de uma chama é causada pelas diferentes temperaturas. Normalmente, a parte mais quente de uma chama (a base) é azul e as partes mais frias do topo são alaranjadas ou amarelas. Além de emitirem luz, as partículas de carbono que sobem podem se acumular nas superfícies ao redor, na forma de fuligem:



(KENT, 2003; WAMPLER, 2006; BRANDON, 2005)

5. Final da queima – o resto do material forma carvão, que é quase carbono puro ou o chamado carvão vegetal, e cinza, que é composta de todos os minerais da madeira que não queimam (cálcio, potássio, etc). É o que sobra da madeira que foi aquecida para remover quase todos os gases voláteis, ficando principalmente carbono e minerais. É por isso que o fogo feito com carvão queima quase sem fazer fumaça.

2.2.2. O MODELO

A célula básica para o modelo proposto de queima de uma floresta é uma árvore simplificada e generalizada como uma fonte de combustível rodeada de oxigênio, presente na atmosfera. Das variáveis generalizadas usadas, a de maior importância é a temperatura da árvore, que deve ser entendida como a temperatura média ou a temperatura aproximada do centro do tronco da árvore. A ideia básica é que essa temperatura varie no tempo seguindo aproximadamente um comportamento gaussiano com grande largura característica. Esse comportamento é regido pela equação 1. As particularidades de cada árvore podem ser evidenciadas nos parâmetros fixados.

$$T(t) = T_{\max} e^{-(t-t_0)^2 / \sigma^2} \quad (1)$$

Podemos fixar três parâmetros para cada tipo de árvore a partir dessa equação:

1. T_{max} → temperatura máxima (média de maior valor) que a árvore pode atingir quando estiver em chamas. Esta variável está ilustrada, na Figura 2.1, mostrando todo o comportamento histórico que a equação gaussiana seguirá na queima da madeira.
2. t_0 → momento (tempo) em que a árvore passa pela temperatura máxima que pode atingir, no meio da curva de aquecimento e esfriamento. Esta variável tem seu valor indefinido até a árvore pegar fogo. Seu valor depende da configuração favorável na dinâmica da simulação e de fatores aleatórios que determinam, probabilisticamente, o momento em que a árvore começa a pegar fogo. Numa gaussiana esse valor fica exatamente no meio da curva, dividindo simetricamente a curva em duas partes na evolução temporal de sua temperatura.
3. σ → pode ser chamado de tempo de queima, mas do ponto de vista matemático é a largura média da curva gaussiana. Esse parâmetro depende indiretamente da quantidade de combustível ou do tamanho da árvore a ser queimada, ou seja, de sua massa. O valor desse parâmetro é estabelecido no momento em que o tipo de árvore é definido.

Outra variável importante, dependente também do tipo de madeira, é a temperatura mínima necessária para que ocorra a liberação e ignição dos gases, T_{ig} , a partir da qual o fogo torna-se auto-sustentável, como ilustrado no segundo o gráfico da Figura 2.1 valores típicos para a temperatura de ignição em árvores comuns estão entre 100°C e 250°C.

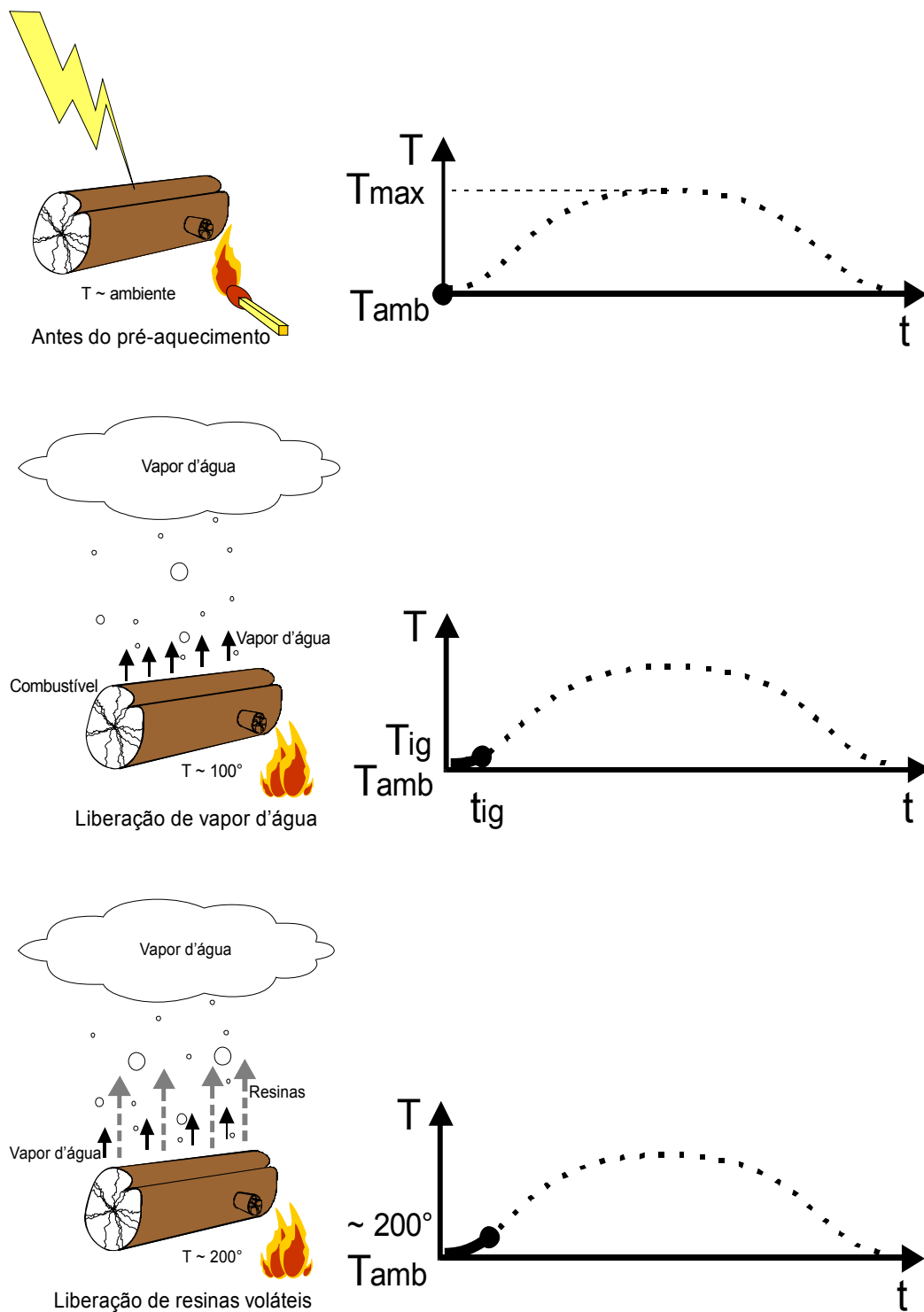


Figura 2.1: Fase 1 – Pré-aquecimento. Ilustração de três momentos do pré-aquecimento. O primeiro é simplesmente o momento da aparição de uma fonte de calor que dever ter constância ou potência suficiente para alimentar toda essa fase.

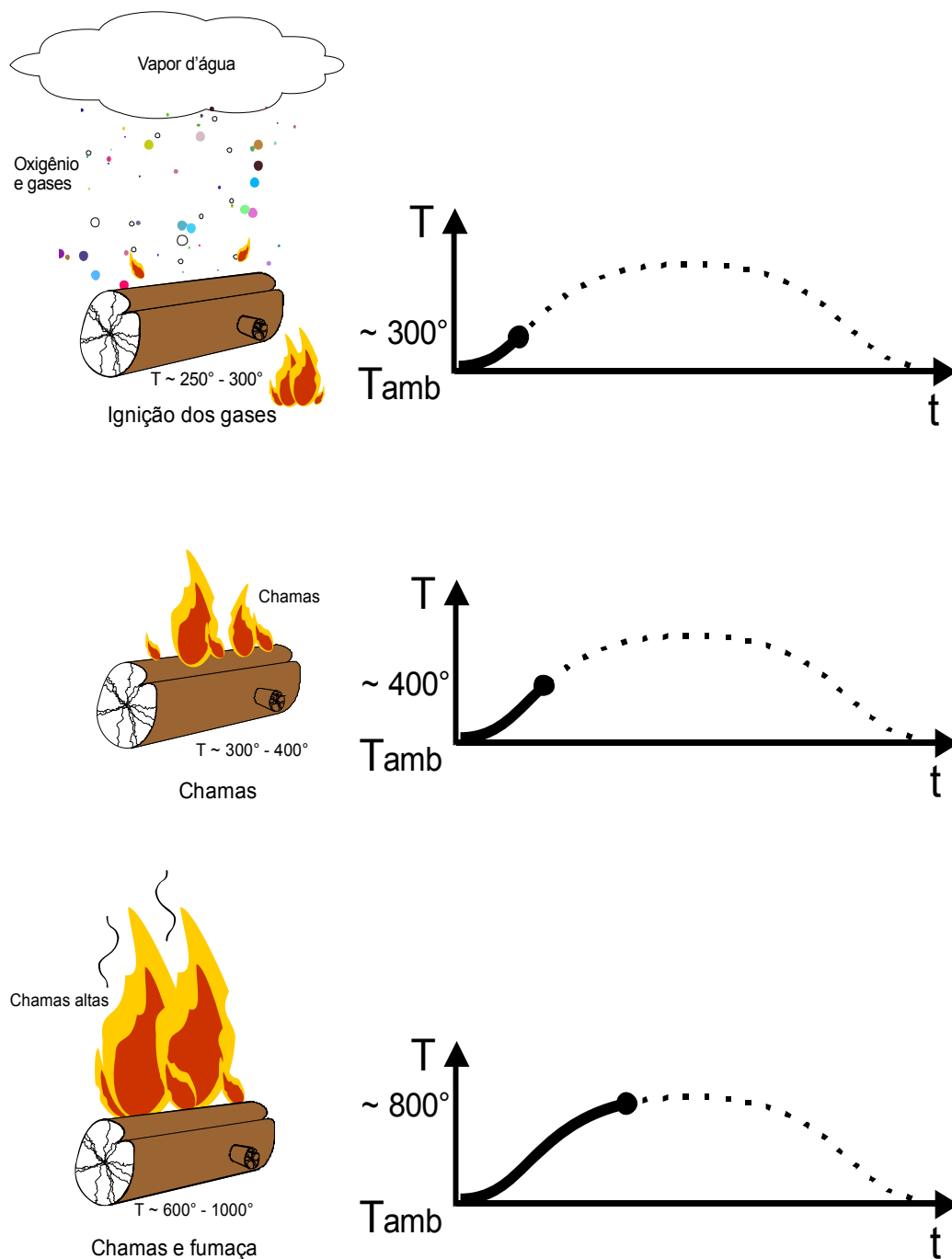


Figura 2.2 : Fase 2 – Fase gasosa ou combustão dos gases. Momento em que a árvore tem maior probabilidade de inflamar uma de suas vizinhas devido ao tamanho maior de suas chamas.

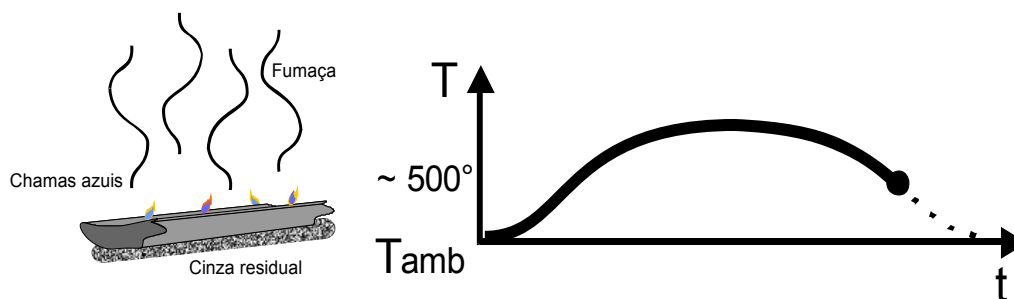


Figura 2.3: Fase 3 – Carbonização. O calor de cada chama deve ser alto, mas o valor aproximando da temperatura média ao redor da árvore carbonizada ou das cinzas é baixo, dando sinais de resfriamento.

2.2.3. MODELAGEM DA FLORESTA

O primeiro passo para a simulação da propagação do fogo em florestas é a modelagem da própria floresta. Para isso, o ponto de partida foi a definição de suas características elementares: tipo e distribuição espacial de sua vegetação, dimensão e relevo. Considerou-se como referência para o modelo proposto, uma floresta ideal, formada por um conjunto de árvores simplificadas, distribuídas densamente em uma região quadrangular, totalmente plana.

Caracterizada a floresta a ser modelado, o desafio passou a ser como representaríamos graficamente suas características físicas e propriedades. Para o desenvolvimento do modelo, utilizou-se a linguagem de programação orientada a objetos C++, através do compilador C++ Builder 5.0 da Borland, para a simulação da região onde está inserida a vegetação, introduzimos um objeto da biblioteca do pacote comercial do compilador C++, cujas propriedades e métodos permitiram representar graficamente, não só o terreno, mas também as árvores nele inseridas (MATEUS, 2000). O objeto utilizado, nomeado como "Vegetação", foi configurado para representar, de forma adequada, a região de incêndios, através da definição de suas propriedades, notadamente a cor, o comprimento e a largura. Na Figura 2.4 observa-se, em dimensão reduzida, o layout final do objeto "Vegetação", após a configuração dessas propriedades.



Figura 2.4: Imagem do objeto existente no compilador C++ Builder 5.0 da Borland, cujas propriedades e métodos nos permitiram representar graficamente, não só o terreno, mas também as árvores nele inseridas.

A unidade fundamental da floresta simulada é a árvore, ou seja, para a simulação da floresta como um todo, preocupou-se, inicialmente, com a modelagem de uma única árvore, definindo a representação gráfica da mesma e suas propriedades. Sabe-se que o objeto “Vegetação”, é visualmente representado por uma matriz de pixels, caracterizados, cada um, essencialmente por uma dimensão, que depende da resolução da tela do computador, por coordenadas espaciais, que os localizam dentro do objeto, e por um número que define a sua cor. Considerando que a floresta simulada seria uma matriz, cujos elementos seriam árvores ou trechos de solo com ausência de vegetação, decidiu-se representar visualmente cada árvore através de um pixel, em que suas coordenadas espaciais determinariam a localização da árvore na floresta, e sua cor definiria o tipo de árvore. Para representar os trechos de solo com ausência de vegetação também utilizamos pixel, porém com cor diferenciada dos tipos de árvores (OUALLINE, 2002).

Todos os pixels que compõem o objeto “Vegetação” inicialmente possuem a cor oliva, que no modelo proposto representa o solo com ausência de vegetação. Essa configuração foi substituída, em seguida, por outra em que cada pixel pode preservar a cor oliva ou assumir a cor verde escuro, que representa as árvores denominadas de tipo 1, ou a cor verde claro que representa árvores denominadas de tipo 2. Essencialmente, a diferença entre as árvores do tipo 1 e as do tipo 2 está na temperatura necessária para ignição da combustão, ou seja, a dificuldade de pegar fogo. Para realizar essa mudança na configuração das cores dos pixels do objeto “Vegetação” e conseqüentemente na

distribuição de árvores modeladas, utilizou-se um conhecido o método estatístico de “Monte Carlo” (em referência aos cassinos encontrados na cidade de Monte Carlo, em Mônaco). Como o próprio nome sugere, esse método trabalha com o acaso, a aleatoriedade, associado à probabilidade de um determinado evento ocorrer. Sendo assim, percorreu-se toda a matriz da “Vegetação”, pixel a pixel, em que cada um teria uma probabilidade “p” de representar as árvores do tipo 1, uma probabilidade “q” de representar as árvores do tipo 2, e outra igual a “r” para representar uma região sem árvore. Especificamente, consideramos “p” > “q” e $r = 1-p-q$. Associa-se a cada pixel, uma variável do tipo vetor, de duas dimensões, cujos índices correspondiam às coordenadas desse pixel, e que armazenava o valor 1, quando a árvore era definida como do tipo 1, o valor 3, quando a árvore era definida como do tipo 2 e o valor zero quando o pixel representava uma região sem árvore. O algoritmo desenvolvido por nós, que modela uma floresta, está descrito no quadro a seguir:

1. Inserir um objeto, formado por uma matriz de pixels, e nomeá-lo de “Vegetação”
2. Alterar o de tamanho da matriz de pixels do objeto para 600 x 600.
3. Definir a cor de todos os pixels como oliva
4. Criar e zerar uma matriz “A” de tamanho 600 x 600.
5. Percorrer a matriz elemento por elemento, e para cada um desses, executar os seguintes passos:
 - a. sortear um número de 0 a 99;
 - b. comparar com um numero de referência, se for menor, atribua o valor 1 ao elemento da matriz e pintar de verde escuro, um pixel do objeto “Vegetação” cujas coordenadas são iguais aos índices do elemento da matriz.
 - c. comparar o mesmo número sorteado com outro de referência, se for maior atribua o valor 3 ao elemento da matriz e pintar de verde claro um pixel do objeto “Vegetação” cujas coordenadas são iguais aos índices do elemento da matriz.

A seguir o trecho principal do algoritmo responsável por introduzir modelos de árvores na floresta simulada, implementado na linguagem de programação C++. Denominou-se esta etapa da simulação de “plantação de árvores”:

```
randomize(); // Função que otimiza a aleatoriedade do gerador de números aleatórios

for(x=1;x<=599;x++) // Estrutura de repetição que percorre a
                    // matriz de pixels, que define a região onde
                    // ocorre a simulação, pixel a pixel, ao longo de
                    // uma linha
{
    for(y=1;y<=599;y++) // Estrutura de repetição que percorre a
                        // matriz de pixels, que define a região onde
                        // ocorre a simulação, pixel a pixel, ao
                        // longo de uma coluna
    {
        sorteio = random(100); // A função random gera números
                                // aleatórios inteiros entre 0 e um
                                // valor máximo, que no caso é 99. A
                                // variável "sorteio" recebe esse
                                // valor.

        if (sorteio < 70) // Bloco de comandos que são executados se a
                            // variável "sorteio" for menor que 70, ou
                            // seja, ha uma probabilidade de 70% desse
                            // bloco ser executado
        {
            A[x][y]=1; // Define o pixel em foco como representante de um
                        // árvore do tipo 1 e armazena essa informação em uma
                        // variável A[][], do tipo vetor, cujas coordenadas
                        // indicam a localização do modelo de árvore na
                        // floresta modelada.

            B[x][y]=1; // Armazena em outra variável do tipo vetor a
                        // informação contida na variável A[][], pois nos é
                        // útil armazenar tal informação em outra local.

            C[x][y]=1; // Armazena em outra variável do tipo vetor a
                        // informação contida na variável A[][], pois nos é
                        // útil armazenar tal informação em mais um local.

            Vegetacao->Canvas->Pixels[x][y]=clGreen; // Define o valor do
                                                        // pixel em foco como
                                                        // verde.
        }

        if (sorteio > 95) // Bloco de comandos que são executados se a
                            // variável "sorteio" for menor que 95, ou
                            // seja, ha uma probabilidade de 4% desse
                            // bloco ser executado
        {
            A[x][y]=3; // Define o pixel em foco como representante de um
                        // árvore do tipo 2 e armazena essa informação em uma
                        // variável A[][], do tipo vetor, cujas coordenadas
```

```
        //indicam a localização do modelo de árvore na
        //floresta modelada.

B[x][y]=3; // Armazena em outra variável do tipo vetor a
           //informação contida na variável A[[]], pois nos é
           //útil armazenar tal informação em outra local.

C[x][y]=3; // Armazena em outra variável do tipo vetor a
           //informação contida na variável A[[]], pois nos é
           //útil armazenar tal informação em mais um local.

Vegetacao->Canvas->Pixels[x][y]= 10000000; // Define o valor do
                                           //pixel em foco como
                                           //verde.

    }
}}}
```

2.2.4. MODELAGEM DO FOCO CALOR

Após a criação do modelo proposto de floresta, a etapa seguinte foi à modelagem do fogo que se propagaria pela vegetação. Essa propagação seria iniciada pela introdução de foco inicial de calors de fogo, escolhidas aleatoriamente. Essas foco inicial de calors seriam nada mais do que árvores isoladas, que no instante zero (antes do primeiro passo de máquina) estariam já em chamas. De forma análoga à representação das árvores do tipo 1 e 2, aquelas definidas como foco inicial de calors de fogo foram associou-se a esses pixels do objeto “Vegetação”, cujas coordenadas indicavam a sua localização e cuja cor foi alterada para vermelho. Também associamos a esses pixels, a mesma variável do tipo vetor, de duas dimensões utilizadas anteriormente, porém atribuímos, agora, o valor 2 para indicar as foco inicial de calors de fogo. Adotou-se esse mesmo valor para indicar árvores que pegaram fogo durante qualquer instante da simulação de incêndios desenvolvida por nós. O algoritmo desenvolvido que modela o foco inicial de calor está descrito no quadro a seguir:

1. Capturar as coordenadas do pixel sob o ponteiro do mouse durante o duplo *click* sobre o objeto vegetação.
2. Se as coordenadas capturadas corresponderem a um pixel que represente uma árvore, atribuir o valor dois ao elemento da matriz A, cujos índices são iguais às coordenadas desse pixel. Atribuir, também a um elemento da matriz “Temperatura” de tamanho 600x600, um valor numérico correspondente à temperatura do foco de calor.

Esse elemento também terá os índices iguais às coordenadas do pixel escolhido. Finalmente, atribuir a esse pixel um tom de vermelho.

3. Se as coordenadas capturadas não corresponderem a um pixel que represente uma árvore, solicitar um novo *click* duplo sobre outro ponto do objeto "Vegetação".

A seguir, o trecho principal do algoritmo que insere foco inicial de calor de fogo na simulação, implementado na linguagem de programação C++. Denominou-se essa etapa da simulação de "introdução do foco inicial de calor":

```
if(A[a][b]==1 || A[a][b]==3) //Bloco de comandos que é executado se a
//variável A[][], cujos índices depende das
//coordenadas do pixel escolhido para ser
//foco inicial de calor, tiver o valor 1 ou
3,
//ou seja, se o pixel representar uma
//árvore do tipo 1 ou 2.
{
A[a][b]=2; //Atribui à variável "A[][]" o valor 2, que é associado a
//um pixel que represente uma árvore em chamas. O valor de
//"a" é igual à coordenada dos eixos das abcissas
//associado ao pixel escolhido e O valor de "b" é igual à
//coordenada dos eixos das ordenadas associado ao mesmo
//pixel.

B[a][b]=2; // Armazena em outra variável do tipo vetor a informação
//contida na variável "A[][]", pois nos é útil armazenar
//tal informação em outra local.

Temperatura[a][b]=Tfoco inicial de calor; //Define uma temperatura para a
foco inicial de calor de
// fogo
corfoco inicial de calor = 2*Tfoco inicial de calor/10; //Define um
número que corresponde ao
//número da cor do pixel associada à
//temperatura da foco inicial de calor
Vegetacao->Canvas->Pixels[a][b]=RGB(corfoco inicial de calor,0,0); //
Muda a cor do
//pixel escolhido
//para ser
//foco inicial de
calor do fogo
estado[a][b]=1; // Marca aquele pixel como um pixel que representa um
// árvore em chamas
}
```

2.2.5. DINÂMICA DO MODELO PROPOSTO DE INCÊNDIOS EM FLORESTAS

2.2.5.1. Fatores externos relevantes na dinâmica da propagação do fogo

Claramente, percebe-se que a propagação do fogo em uma floresta é a queima progressiva de árvores e conseqüência direta da influência daquelas que estão em chamas, sobre as árvores mais próximas que ainda não pegaram fogo. Há uma espécie de “contaminação” gradativa através de um mecanismo que envolve fatores conhecidos ou não. O objetivo é simular esse mecanismo existente na natureza, de tal forma a aproximar o máximo possível o modelo proposto do que acontece na realidade (GOULD, 1996).

Sabe-se que diversos fatores externos atuam no espalhamento do fogo, auxiliando-o ou inibindo-o. É essencial para o desenvolvimento do modelo, a compreensão de como cada um desses fatores influencia na propagação do fogo. Porém, deve-se, a princípio, conhecer primeiro quem são esses fatores. Para isso, nos concentramos em uma árvore que ainda não está em chamas, pertencente a uma floresta onde estaria ocorrendo um incêndio, e se procurou, através de uma análise da dinâmica de propagação do fogo baseado em estudos experimentais de engenharia florestal e modelos computacionais (BATISTA, 1990; GOULD, 1996), chegar a um conjunto definido de fatores externos que possam influenciar a queima da árvore. Essencialmente, essa análise revelou a existência de pelo menos dois fatores, extremamente relacionados, cuja simulação seria fundamental para a eficácia do modelo proposto: localização da árvore em relação as que já estão em chamas e a temperatura média devido ao fogo na vizinhança. Convencionou-se que a vizinhança que seria levada em consideração para que uma determinada árvore pegue fogo seria aquela formada pelos quatro sítios (árvores ou regiões sem vegetação) mais próximos à árvore em foco. Lembra-se que se está trabalhando com uma matriz de pixels representando um conjunto desses elementos, ou seja, a vizinhança seria formada pelos pixels imediatamente acima, abaixo, à esquerda e à direita do pixel que representa a árvore em foco (OUALLINE, 2002).

Em relação à influência da temperatura da vizinhança sobre uma árvore, adotou-se a temperatura média dos vizinhos como fator determinístico para a árvore pegar fogo, ou seja, somou-se as temperaturas dos quatro vizinhos e se dividiu por quatro, se o valor encontrado superar o número associado à temperatura de ignição daquela árvore, essa necessariamente pegará fogo. Deve-se ressaltar que para todas as árvores que compõe a

floresta, como para os trechos sem árvores, há um valor associado à temperatura antes do início da queimada, equivalente à temperatura ambiente.

O algoritmo que desenvolvido para a modelagem da ação de fatores externos conhecidos, relevantes na dinâmica da propagação do fogo, está descrito no quadro a seguir:

1. Criar e zerar a matriz "estado", de tamanho 600 x 600.
2. Realizar N repetições dos passos abaixo:
 - a. Percorrer as matrizes "estado", elemento por elemento, e para cada um desse executar os seguintes passos:
 - Avaliar se o elemento da matriz é igual a zero, que significa que a árvore associada a ele ainda não pegou fogo.
 - Se isso for verdade, calcular o valor da média da temperatura dos vizinhos dessa árvore.
 - Se essa média for maior do que a temperatura de ignição da árvore, essa pegará fogo, e atribuímos o valor 1 ao elemento da variável "estado" associado à árvore.

A mesma análise da dinâmica de propagação do fogo que nos revelou os fatores externos bem conhecidos que influenciam a árvore a pegar fogo, concluiu-se que há uma quantidade indefinida de fatores desconhecidos que atuam significativamente no espalhamento da queimada. O desafio de modelar cada um desses fatores é uma tarefa altamente complexa, pois se trabalhando com o desconhecido, porém há ciência que tais fatores existem e que são importantes para a aproximação do modelo à realidade, nos forçou a buscarmos uma forma de implementar seus efeitos. A solução foi, ao invés de modelarmos a ação de cada fator isoladamente, utilizarmos um método que simulasse o efeito resultante dessas ações em conjunto, o método de "Monte Carlo". Essencialmente, concentramos em uma probabilidade "p" de uma árvore pegar fogo, a influência de todos os fatores externos desconhecidos ou de difícil controle que atuam na dinâmica do fogo. Sendo assim, mesmo que a média dos vizinhos não supere a temperatura de ignição de uma árvore, essa pode pegar fogo através de um mecanismo fora do nosso controle ou conhecimento de seus valores ou comportamento. No método de "Monte Carlo" tal

mecanismo é simulado através de sorteios cujos resultados determinam se a árvore pega fogo ou não (GOULD, 1996). Devemos ressaltar, ainda, que se define um pré-requisito para que a probabilidade “p” de uma árvore pegar fogo fosse maior do que zero: que pelo menos uma árvore vizinha à árvore em foco esteja em chamas. Quanto maior o número de árvores vizinhas com fogo, maior o valor de “p”.

O Método de “Monte Carlo” permitiu também a modelagem de outros fatores conhecidos que influenciam relevantemente a propagação do fogo, mas que podem ser considerados de difícil modelagem, como por exemplo, a umidade da árvore ou da floresta e a ação dos ventos. Como forma de otimizar a proximidade da dinâmica do modelo proposto com a dinâmica real de propagação do fogo, decidiu-se criar uma ferramenta que permitisse variar a intensidade da ação do vento, conjuntamente com definição de sua direção.

O algoritmo desenvolvido para a modelagem da ação de fatores externos relevantes na dinâmica da propagação do fogo não conhecidos está descrito no quadro a seguir:

1. Criar e zerar a matrizes “estado”, de tamanho 600 x 600.
2. Criar e zerar uma variável “p” relativa à probabilidade da árvore, associada ao elemento da matriz “estado”, pegar fogo.
3. Realizar N repetições dos passos abaixo:

- a. Percorrer as matrizes “estado”, elemento por elemento, e para cada um desse executar os seguintes passos:

- Avaliar se o elemento da matriz estado é igual a zero, que significa que a árvore associada a ele ainda não pegou fogo.
- Se isso for verdade, avalia-se os quatro vizinhos da árvore associada a esse elemento. Para cada vizinho que representar uma árvore em chamas, o valor da variável “p” recebe um incremento.
- Sortea-se um valor entre 0 e 99, se este for menor que “p” a árvore associada ao elemento da

matriz "estado" pegará fogo, através da atribuição do valor 1 a esse elemento.

Na implementação do algoritmo responsável por introduzir a ação de fatores externos, conhecidos ou desconhecidos, relevantes na dinâmica da propagação do fogo, realiza-se uma composição dos dois últimos algoritmos aqui descritos, além de adiciona-se outros recursos essenciais para a simulação. Denomina-se esta etapa da simulação de "propagação do fogo":

```
for(passo=0;passo<=npassos;passo++) // Estrutura de repetição
//responsável pela simulação propriamente dita, através da execução dos
// comandos abaixo, a cada passo de máquina, até o numero de passo for
//igual ao máximo definido pelo usuário
{
    randomize(); // Função que otimiza a aleatoriedade do
                // gerador de numeros aleatorios

    for(x=0;x<=600;x++) // Estrutura de repetição que percorre a
                        // matriz de pixels, que define a região
                        // onde ocorre a simulação, pixel a
                        // pixel, ao longo de uma linha
    {
        for(y=0;y<=600;y++) // Estrutura de repetição que percorre
                            // a matriz de pixels, que define a
                            // região onde ocorre a simulação,
                            // pixel a pixel, ao longo de uma
                            // coluna
        {
            if(estado[x][y]==0) // Os comandos que compõem este
                                // bloco só são executados se a
                                // árvore em questão nunca tiver
                                // pegado fogo
            {
                if (A[x][y]==1) // Os comandos que compõem este
                                // bloco são so executados se a
                                // árvore em questão for do tipo 1
                {
                    {
                        ignição=(Temperatura[x+1][y]+Temperatura[x][y+1]+Temperatura[x-
                        1][y]+Temperatura[x][y-1])/4; // A variável ignição recebe o valor da
                                                    // média das temperaturas
                                                    // das quatro árvores vizinhas à árvore
                                                    // em foco
                        Temperatura2[x][y]=ignicao; // atualiza a temperatura da árvore,
                                                    // atribuindo a //ela o valor da média das temperaturas dos quatro vizinhos
                        p=0; // O valor inicial zero é atribuído a
                            // variável "p", pois seu novo valor
                            // depende do valor já contido na
                            // variável
                    }
                }
            }
        }
    }
}

if (estado[x-1][y]==1 && Temperatura[x-1][y]> Tig1) // Se a árvore
// vizinha da esquerda tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for
// superior a uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário no
```

```
// inicio do programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe
// um incremento

    p=p+k; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
           //também do numero associado á barra de rolagem que
           // representa a ação da componente horizontal do vento
if (estado[x+1][y]==1 && Temperatura[x+1][y]> Tig1)// Se a árvore vizinha
// da direita tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for superiora
// uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário no inicio do
// programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe um
// incremento

    p=p+1; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
           // também do numero associado á barra de rolagem que
           // representa a ação da componente horizontal do vento

if (estado[x][y-1]==1 && Temperatura[x][y-1]> Tig1)// Se a árvore vizinha
// de cima tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for superior a
// uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário no inicio do
// programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe
// um incremento

    p=p+m; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
           //também do numero associado á barra de rolagem que
           // representa a ação da componente vertical do vento

if (estado[x][y+1]==1 && Temperatura[x][y+1]> Tig1)// Se a árvore vizinha
// de cima tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for superior a
// uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário no inicio do
// programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe
// um incremento

    p=p+n;// Variável p recebe um incremento, cujo valor depende também
// do numero associado á barra de rolagem que representa a ação
// da componente vertical do vento

    s2=random(101)+influencia;// A variável s2 recebe um numero
                               // inteiro aleatorio entre zero
                               // adicionado de um valor inteiro que
                               // depende do grau de influência de
                               // fatores aleatórios na simulação.

if (ignicao>=Tig1 || p>s2) // Bloco de comandos que é executado se a
// temperatura de ignição da árvore em foco for atingida ou o valor da
// variável "p" for maior do que o da variável s2
{

    B[x][y]=2; // Inse na váriavel B[[]], do tipo vetor, o valor
               // dois que representas as árvores que pegaram fogo.

    estado[x][y]=1;// Inse na váriavel estado[[]], do tipo vetor,
                   // o valor 1 que indica que também indica que a
                   // árvore em questão pegou fogo

    tig[x][y]=passo; // Inse na variável tig[[]], do tipor vetor,
                    // que armazena em que instante uma
```

```
        // determinada árvore pegou fogo, o valor da
        // variável passo, que indica
        // quantos passos de máquina foram dados até o
        // momento em que a árvore em foco pegou fogo
    }
}

if (A[x][y]==3) // Os comandos que compõem este bloco são so executados
                //se a árvore em questão for do tipo 1
{
    ignicao=(Temperatura[x+1][y]+Temperatura[x][y+1]+Temperatura[x-
1][y]+Temperatura[x][y-1])/4; //A variável ignição recebe o valor
                                //da média das temperaturas das
                                //quatro árvores vizinhas à árvore
                                //em foco

    Temperatura2[x][y]=ignicao; // atualiza a temperatura da árvore,
// atribuindo a ela o valor da média das temperaturas dos quatro vizinhos

    p=0; // O valor inicial zero é atribuído a variável "p", pois
        //seu novo valor depende do valor já contido na variável

    if (estado[x-1][y]==1 && Temperatura[x-1][y]> Tig2) // Se a árvore vizinha
// da esquerda tiver pegando fogo e sua temperatura no momento
// for superior a uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo
//usuário no inicio do programa, a probabilidade da árvore
//em foco pegar fogo recebe um incremento

        p=p+k; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
                //também do numero associado á barra de rolagem que
                //representa a ação da componente horizontal do vento

    if (estado[x+1][y]==1 && Temperatura[x+1][y]> Tig2) // Se a árvore vizinha
// da direita tiver pegando fogo e sua temperatura no momento
// for superior a uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo
// usuário no inicio do programa, a probabilidade da árvore em foco pegar
// fogo recebe um incremento

        p=p+l; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
                //também do numero associado á barra de rolagem que
                //representa a ação da componente horizontal do vento

    if (estado[x][y-1]==1 && Temperatura[x][y-1]> Tig2) // Se a árvore
// vizinha de cima tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for
// superior a uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário
// no inicio do programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe
// um incremento

        p=p+m; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
                //também do numero associado á barra de rolagem que
                //representa a ação da componente vertical do vento

    if (estado[x][y+1]==1 && Temperatura[x][y+1]> Tig2) // Se a árvore vizinha
// de cima tiver pegando fogo e sua temperatura no momento for superior a
// uma temperatura de referencia Tig1 definida pelo usuário no inicio do
// programa, a probabilidade da árvore em foco pegar fogo recebe
// um incremento

        p=p+n; // Variável p recebe um incremento, cujo valor depende
```

```
        //também do numero associado á barra de rolagem que
        //representa a ação da componente vertical do vento

s2=random(101)+influencia; //A variável s2 recebe um numero
                           //inteiro aleatorio entre zero
                           //adicionado de um valor inteiro que
                           //depende do grau de influência de
                           //fatores aleatórios na simulação.

if (ignicao>=Tig2 || p>s2)// Bloco de comandos que é executado se a
//temperatura de ignição da árvore em foco for atingida ou o valor da
//variável "p" for maior do que o da variável s2

{
  B[x][y]=2; // Insere na váriavel B[[]], do tipo vetor, o valor
             //dois que representas as árvores que pegaram fogo.

  estado[x][y]=1; //Insere na váriavel estado[[]], do tipo vetor,
                  //o valor 1 que indica que também indica que a
                  // árvore em questão pegou fogo

  tig[x][y]=passo; //Insere na variável tig[[]], do tipor vetor,
                  //que armazena em que instante uma determinada
                  //árvore pegou fogo, o valor da variável
                  //passo, que indica quantos passos de máquina
                  //foram dados até o momento em que a árvore em
                  //foco pegou fogo
                }
            }
        }
```

2.2.5.2. Aspectos relevantes da queima de uma única árvore, que influenciam na dinâmica da propagação do fogo

Abordar-se-á aqui características da queima de uma única árvore, importantes para a modelagem da propagação do fogo em uma floresta e os métodos implementados para simular tais características. Na metodologia, considerou-se de fundamental importância, a definição de quais propriedades associadas a cada árvore e que influenciam no processo global do incêndio, seriam estudadas e modeladas. Selecionou-se as seguintes propriedades: localização da árvore, volume da árvore, tipo de madeira e finalmente, a temperatura de ignição do fogo para cada árvore.

Para cada uma dessas propriedades, definiu-se variáveis que guardam seus valores associados a cada árvore da floresta modelada. Verificou-se que, a localização de uma árvore é definida pelas coordenadas do pixel correspondente a ela. A massa é um número que está relacionado com o tempo de queima de cada uma. O tipo de madeira está relacionado com a árvore ser do tipo 1 ou do tipo 2, ou seja, com a dificuldade de pegar

fogo. O mesmo ocorrendo com a temperatura de ignição, já que se associou um valor para cada tipo de árvore.

Além das propriedades apresentadas acima, é de extrema importância para o êxito do modelo proposto, acompanharmos a evolução da temperatura de cada árvore. A idéia básica é que essa temperatura varie no tempo seguindo aproximadamente um comportamento gaussiano rerepresentada, a seguir, pela equação 1, agora em um formato mais específico, direcionado para a implementação do nosso algoritmo, na equação 2:

$$Temperatura[x][y] = T \max \times e^{-(t-t_0[x][y])^2 / \sigma^2} \quad (2)$$

Em relação às alterações na equação 1, evidenciadas na equação 2, deve-se destacar que:

- $x \rightarrow$ é a coordenada espacial de uma determinada árvore, no eixo das abscissas;
- $y \rightarrow$ coordenada espacial dessa árvore, no eixo das ordenadas;
- $Temperatura[x][y] \rightarrow$ é a temperatura da árvore no instante t, em passo de máquina;
- $Tempmax \rightarrow$ é a temperatura máxima que essa árvore pode atingir;
- $t_0[x][y] \rightarrow$ é o tempo decorrido desde que essa determinada árvore pegou fogo até ela atingir a sua temperatura máxima.

Como destacado anteriormente, o valor de t_0 não é conhecido previamente, pois depende do instante em que cada árvore pega fogo, o que não pode ser previsto. Para cada árvore, devemos calcular o valor de seu t_0 , que pode ser obtido, através da utilização da equação 2, no instante em que se inicia a queima dessa árvore, seguindo os seguintes passos:

$$Tignição[x][y] = T \max \times e^{-(tig-t_0[x][y])^2 / \sigma^2} \quad (3)$$

$$\ln(Tignição[x][y]) = \ln(T \max \times e^{-(tig-t_0[x][y])^2 / \sigma^2}) \quad (4)$$

$$\ln(Tignição[x][y]) = \ln(T \max) + \ln(e^{-(tig-t_0[x][y])^2 / \sigma^2}) \quad (5)$$

$$\ln(Tignição[x][y]) - \ln(T \max) = -(tig - t_0[x][y])^2 / \sigma^2 \quad (6)$$

$$-\ln \frac{(Tignição[x][y])}{(T \max)} = (tig - t_0[x][y])^2 / \sigma^2 \quad (7)$$

$$\ln \frac{(T \max)}{(Tignição[x][y])} \times \sigma^2 = (tig - t_0[x][y])^2 \quad (8)$$

$$\pm \sqrt{\ln \frac{(T \max)}{(Tignição[x][y])}} \times \sigma = tig - t_0[x][y] \quad (9)$$

$$t_0[x][y] = tig + \sqrt{\ln \frac{(T \max)}{(Tignição[x][y])}} \quad (10)$$

Em que:

- t_{ig} → é o tempo decorrido desde o início da queimada até o momento em que a árvore pega fogo;
- $T_{ignição}[x][y]$ → é a temperatura de ignição de fogo da árvore.

Como recurso visual, associou-se cores diferentes para cada temperatura atingida pelas árvores. Para isso, definiu-se uma função “cor” cuja variável independente é a temperatura da árvore. Os valores dessa função variam de 0 a 200, enquanto a temperatura pode variar de 0 a 1000, dependendo das condições iniciais definidas. Logo, matematicamente se pode definir a função cor através da seguinte equação:

$$cor = \frac{(Temp[x][y] \times 2)}{10} \quad (11)$$

O algoritmo desenvolvido, que modela a evolução da temperatura de uma árvore em processo de queima, está descrito a seguir:

- | |
|--|
| 1. Realizar N repetições dos passos abaixo: |
| a. Percorrer a matriz “estado”, elemento por elemento, e para cada um desse executar os seguintes passos: |
| - Avaliar se o elemento da matriz “estado” é diferente de zero, que significa que a árvore associada a ele está pegando fogo. |
| - Se isso for verdade, calculamos o valor, em passo de máquina, do instante em que a árvore associada ao elemento da matriz “estado” atingirá sua temperatura máxima. |
| - Introduzir esse valor encontrado na fórmula que calcula o valor da temperatura em função do tempo, em passo de máquina, e achar o valor da temperatura, no instante considerado. |
| - Atribuir uma cor ao pixel do objeto “Vegetação” associado ao elemento da variável “estado”. Essa cor deve estar associada ao valor da temperatura encontrado. |

A seguir, o trecho principal do algoritmo responsável pela modelagem da evolução da temperatura de uma árvore em processo de queima. Denominou-se esta etapa da simulação de “acompanhamento da temperatura de cada árvore”:


```
else // Bloco de comando que é executado se a árvore em foco já
//tiver pego fogo em algum instante anterior
{
if (C[x][y]==1) // Bloco de comandos que é executado se a
// árvore em questão for do tipo 1

t0[x][y]=tig[x][y] + sqrt(log(1000/Tig1))* Sigma[x][y]; // Calcula
// o valor do tempo, em passo de máquina, decorrido entre o instante
//em que a árvore pega fogo e o instante que esta atinge sua
//temperatura máxima

if (C[x][y]==3)// Bloco de comandos que é executado se a
//árvore em questão for do tipo 2

t0[x][y]=tig[x][y] + sqrt(log(1000/Tig2))* Sigma[x][y]; // Calcula o
//valor do tempo, em passo de máquina, decorrido entre o instante em
//que a árvore pega fogo e o instante que esta atinge sua temperatura
//máxima

Temperatura2[x][y]= 1000*exp( (-1)*pow( (passo-t0[x][y]),2 ) / pow(
(Sigma[x][y]),2 ) ); // Calcula o valor da temperatura da árvore em
//foco no instante

cor[x][y]=int((2*Temperatura[x][y])/10); //Determina qual será cor
//do pixel que representa a
//árvore em foco, em função
//de sua temperatura

Vegetacao->Canvas->Pixels[x][y]=RGB(cor[x][y]+50,0,0); // Muda o valor //da
cor do pixel que representa a árvore em foco para o determinado //logo
acima
}
```

2.2.6. Implementação de Ferramentas de Medidas para a Extração de Resultados da Simulação

A finalidade imediata do desenvolvimento de um modelo que, a partir de princípios da natureza, simule incêndios em florestas, é a obtenção de um recurso que forneça uma percepção visual da dinâmica de propagação de fogo, em escala espacial e temporal reduzida. Porém, a importância de tal percepção é minimizada se não aliar a essa, métodos para a extração de informações importantes fornecidas pelo modelo. Para execução dessa etapa, ferramentas computacionais podem ser utilizadas a fim de otimizar o processo, logo, implementou-se algoritmos específicos que atuam como ferramentas de medidas ou monitores de variáveis, que permitem não apenas a realização da análise dos resultados, mas também a avaliação sobre o grau de aproximação do modelo proposto à realidade.

As ferramentas de medidas que implementadas podem ser definidas em dois grupos: o primeiro é caracterizado por métodos de extração de dados, obtidos, em geral, durante a simulação, para traçar gráficos; o segundo é composto por uma ferramenta que realiza uma análise estatística dos resultados obtidos. Para o desenvolvimento das ferramentas que compõem o primeiro grupo, introduziu-se no algoritmo principal responsável pela simulação de incêndios, variáveis que armazenam valores associados a informações específicas, que serão visualizadas graficamente. Para a construção dos gráficos, utilizou-se um objeto, disponível no compilador C++ Builder 5.0 da Borland, que gera gráficos a partir de valores das coordenadas dos pontos a serem representados. Esse objeto define, automaticamente a escala adequada para a apresentação do gráfico na tela.

A partir de uma análise bem simplificada, pode-se distinguir dois estados diferentes para as árvores que pegaram fogo na floresta incendiada: ou estão ainda pegando fogo ou já foram queimadas. Obviamente, para realizar tal separação, deve-se estabelecer um critério bem definido para o enquadramento de uma árvore em um dos dois grupos. Lembrando que a temperatura da árvore que pegou fogo cresce, atinge um máximo e decresce. Considerou-se que as árvores incendiadas que já estiverem com a temperatura menor do que a de ignição fazem parte do grupo das queimadas. Obviamente, o oposto é a condição para uma árvore estar no outro grupo. Depois de realizada tal distinção, tem-se fundamentos suficiente para abordar os métodos aqui utilizados para a implementação dessa primeira ferramenta de medida. A análise dos resultados visuais da simulação mostrou que, em uma situação ideal, sem ação de ventos, a expansão do fogo ocorre de maneira uniforme em todas as direções. Logo, pode-se associar um valor médio de raio a cada momento em que à frente de fogo avança, isto é, a distância entre o foco inicial de calor e a fronteira limite de fogo na direção radial. Ao final de um período de tempo, a imagem que representa a região de árvores que pegaram fogo se aproxima de uma circunferência, o que sugere imediatamente a existência de uma única circunferência, caracterizada por um “raio médio” cujo valor é igual à média de todos os raios existentes para cada direção naquele mesmo instante.

Considerou-se que informações conclusivas sobre a dinâmica de propagação do fogo poderiam ser obtidas a partir da monitoração do número de árvores queimadas e de árvores que ainda estavam em processo de queima ao fim da simulação, em função do raio médio da região incendiada, para cada instante de tempo. Por isso, no algoritmo de simulação de incêndios, a cada passo de máquina realizado, contabilizou-se o número de árvores de cada estado e o raio médio da região incendiada. Ao fim da simulação se obtém as informações necessárias para os de dois gráficos:

Gráfico 1: Número de árvores queimadas em função do raio médio ou do tempo;

Gráfico 2: Número de árvores ainda em processo de função do raio médio ou do tempo.

A importância dos resultados obtidos através da análise dos gráficos 1 e 2 é potencializada quando se avalia os dois gráficos conjuntamente, por isso se implementou outra ferramenta de medida que traça os resultados de ambos em um gráfico apenas, gerando o gráfico 3:

Gráfico 3: Confrontando gráfico 1 e gráfico 2.

Julgou-se importante também, acompanhar o decréscimo do número de árvores do tipo 1 e do tipo 2 em função do raio médio da região incendiada a cada instante de tempo. Logo, no algoritmo de simulação de incêndios, a cada passo de máquina realizado, contabilizou-se, além do raio médio, o número de árvores de cada tipo. Ao fim da simulação, tem-se armazenado em variáveis as informações necessária para traçar os dois gráficos:

Gráfico 4: Número de árvores do tipo 1 função do raio médio ou do tempo;

Gráfico 5: Número de árvores do tipo 2 função do raio médio ou do tempo.

Assim como na análise dos gráficos 1 e 2, é importante avaliarmos o comportamento dos gráfico 3 e 4, conjuntamente. Realizou-se tal procedimento, o que gerou o gráfico 6:

Gráfico 6: Confrontando gráfico 4 e gráfico 5.

A seguir, apresenta-se o algoritmo desenvolvido para contabilizar o número de árvores queimadas, em processo de queima, do tipo 1 e do tipo 2, além do valor do raio médio para cada instante de tempo. Denominou-se essa etapa da simulação de “extração de parâmetros”.

1. A cada passo de máquina, ainda durante a simulação, percorrer, elemento por elemento, a matriz que representa a floresta modelada e para cada elemento que representar uma árvore da fronteira de fogo naquele instante, achar o valor de sua distância à foco inicial de calor. Contabilizar o número de árvores da fronteira e somar todas as distâncias calculadas.
2. Dividir o resultado da soma de todas as distâncias calculadas pelo número de árvores da fronteira. O resultado deve ser inserido em uma variável que guarda o valor do raio médio a cada passo de máquina.
3. Percorrer novamente, a cada passo de máquina, durante a simulação, a matriz que representa a floresta modelada e guardar, em quatro variáveis diferentes, o número de elementos que representam árvores: queimadas, em processo de queima, do tipo 1 e do tipo 2.

Em seguida é apresentado o trecho do programa correspondente.

```
//Estrutura de repetição que percorre uma matriz de elementos
//associada a cada tipo de árvore da floresta modelada.
for(x=0;x<=600;x++)
{
for(y=0;y<=600;y++)
{
    if(D[x][y]==1)// Bloco de comando que é executado se o
//elemento da matriz "D" corresponder a uma árvore da fronteira de
//fogo.
    {
        contador=contador+1; // Contabiliza o número de árvores
//da fronteira de fogo
        raio = sqrt( (x-300)*(x-300)+(y-300)*(y-300) ); // Calcula a
//distância de cada árvore da fronteira à foco inicial de calor
        Somaderaio = Somaderaio+raio; //Soma os valores da
//distância de cada árvore da fronteira à foco inicial de calor
    }
}
}

Raiomedio[passo]=Somaderaio/contador;
// Acha o valor do raio médio em função do passo de máquina

//Estrutura de repetição que percorre uma matriz de elementos //associada a
cada tipo de árvore da floresta modelada.
for(x=0;x<=600;x++)
{
for(y=0;y<=600;y++)
{
    if(A[x][y]==2 && Temperatura[x][y]>Tig1) // Comando que é
//executado se o elemento da matriz "A" corresponde a uma árvore que
//tenha pego fogo mas que ainda esteja em processo de queima
        emchamas[passo] = emchamas[passo]+1;

    if(A[x][y]==2 && Temperatura[x][y]<Tig1) // Comando que é
//executado se o elemento da matriz "A" corresponde a uma árvore que
//tenha pego fogo e que já esteja em queimada
        queimadas[passo]=queimadas[passo] +1;

    if(A[x][y]==1) // Comando que é executado se o elemento da
//matriz "A" corresponde a uma árvore do tipo 1
        arvores1[passo]=arvores1[passo] +1;

    if(A[x][y]==3) // Comando que é executado se o elemento da
//matriz "A" corresponde a uma árvore do tipo 1
        arvores2[passo]=arvores2[passo] +1;
}
}
}
```

Avaliou-se que conclusões interessantes poderiam ser obtidas através do monitoramento do valor da temperatura ao longo de um raio da região incendiada, pois um comportamento padrão poderia ser revelado, e assim mais variáveis poderiam ser considerados na caracterização da propagação do fogo em florestas, como a intensidade e

direção do vento. Para obter uma medida associada a esse comportamento, implementou-se uma ferramenta que, depois de finalizada a simulação, retorna graficamente as diversas medidas da temperatura obtidas ao longo de uma direção radial. Para minimizar alguns efeitos das irregularidades geométricas ou alta variabilidade da faixa de árvores em chamas em uma única direção radial, realizou-se uma média da distribuição radial da temperatura em oito direções radiais igualmente separadas por 45°. Através dos dados extraídos se traçou o Gráfico 7: Distribuição radial dos valores médios da temperatura a partir da origem da foco inicial de calor.

Tão importante quanto a avaliação do gráfico 7 é a análise da sua evolução ao longo do tempo, pois novas conclusões relevantes podem ser obtidas. Logo, desenvolveu-se uma outra ferramenta apresentada no gráfico 7, em cada instante do tempo, o que permite ver um deslocamento da curva gerada. A seguir, apresenta-se o algoritmo para extrair o valor da temperatura em cada ponto que compõe um raio da região incendiada, a cada passo de máquina. Esse procedimento também está inserido na parte da simulação que denominada de “extração de parâmetros”.

```
1. Definir oito raios a partir do foco inicial de calor que formam 45 graus entre si.  
2 A cada passo de máquina, percorrer os oito raios, ponto a ponto, a partir da foco inicial de calor, ponto e extrair a média das oito temperaturas dos pontos de cada raio, localizados a mesma distância da foco inicial de calor.  
3. Para cada passo, armazenar o valor da média da temperatura em função da distância de cada conjunto de 8 pontos à foco inicial de calor.
```

Apresenta-se, em seguida, a implementação desse algoritmo.

```
float raiz=sqrt(2)/2;  
  
while(a<=300) // Estrutura de repetição que é executada até  
// a variável a atingir um valor acima de 300  
{  
    temp[a][passo]=(Temperatura[x+a][y]+Temperatura[x-a][y ]+  
Temperatura[x][y+a]+Temperatura[x][y-a]  
+Temperatura[x+int(a*raiz)][y+int(a*raiz)]  
+Temperatura[x-int(a*raiz)][y+int(a*raiz)]+Temperatura[x+int(a*raiz)][y-  
int(a*raiz)] +Temperatura[x-int(a*raiz)][y-int(a*raiz)])/8; //calcula a  
// média das temperaturas e atribui o valor a uma variável que está em
```

```
// função da distancia de cada conjunto de oito pontos à foco inicial de
calor e do
// valor do passo de máquina.
    a=a+1;
}
```

Uma outra medida importante para, não só avaliar a eficiência do modelo proposto, mas também realizar a extração de informações relevantes sobre a dinâmica do fogo, é a sua velocidade de propagação do incêndio. A noção de velocidade pode ser introduzida através da medição da variação de diversas grandezas em função do tempo, logo é necessária a definição de quais delas poderia propiciar os melhores resultados. Optou-se por medir como o raio médio da região incendiada cresce ao longo do tempo. Essa medida já foi realizada para a implementação das ferramentas de medidas apresentadas anteriormente e seus resultados serão traçados no Gráfico 8: Número de passos de máquina X raio médio.

Todas as etapas descritas para traçar os vários gráficos sobre a evolução do incêndio foram implementadas no programa através de uma interface mais geral. A seguir o trecho principal do algoritmo, já implementado em C++, que alimenta essa ferramenta ou interface com os dados necessários, extraídos durante a simulação. Denominou-se essa etapa da simulação de “plotagem dos gráficos”:

```
if(RadioButton4->Checked==true) // Bloco de comandos que é executado
// se o usuário selecionar essa ferramenta gráfica
{
// Bloco que desleciona qualquer uma das demais ferramentas gráficas
//selecionadas anteriormente
    RadioButton2->Checked=false;
    RadioButton1->Checked=false;
    RadioButton3->Checked=false;
    RadioButton5->Checked=false;
    RadioButton6->Checked=false;
    RadioButton7->Checked=false;
// "Limpa" o gráfico que estiver na tela antes de desenhar o novo
// gráfico
    Series1->Clear();
    Series3->Clear();

    for (x =0; x<=npassos; x++)// Estrutura de repetição que
//desenha o gráfico gerado por essa ferramenta, a partir de um
//conjunto de pares ordenados de pontos.
    {
Series1->AddXY(Raiomedio[x], queimadas[x], "",clBlack); //Marca cada
//ponto do gráfico gerado por essa ferramenta gráfica.
}
    }
if(RadioButton5->Checked==true) // Bloco de comandos que é executado
//se o usuário selecionar essa ferramenta gráfica
```

```
{
// Bloco que desleciona qualquer uma das demais ferramentas gráficas
//selecionadas anteriormente

    RadioButton2->Checked=false;
    RadioButton1->Checked=false;
    RadioButton4->Checked=false;
    RadioButton3->Checked=false;
    RadioButton6->Checked=false;
    RadioButton7->Checked=false;

// "Limpa" o gráfico que estiver na tela antes de desenhar o novo
//gráfico
    Series2->Clear();
    Series3->Clear();

    for (x =0; x<=npassos; x++)// Estrutura de repetição que
//desenha o gráfico gerado por essa ferramenta, a partir de um
//conjunto de pares ordenados de pontos.
    {
Series2->AddXY(Raiomedio[x], emchamas[x], "",clRed); //Marca cada
//ponto do gráfico gerado por essa ferramenta gráfica.
    }
}
if(RadioButton6->Checked==true) // Bloco de comandos que é executado
//se o usuário selecionar essa ferramenta gráfica
{
// Bloco que desleciona qualquer uma das demais ferramentas gráficas
//selecionadas anteriormente

    RadioButton2->Checked=false;
    RadioButton1->Checked=false;
    RadioButton4->Checked=false;
    RadioButton5->Checked=false;
    RadioButton3->Checked=false;
    RadioButton7->Checked=false;
// "Limpa" o gráfico que estiver na tela antes de desenhar o novo
//gráfico
    Series1->Clear();
    Series2->Clear();
    Series3->Clear();
    for (x =0; x<=npassos; x++)// Estrutura de repetição que
//desenha o gráfico gerado por essa ferramenta, a partir de um
//conjunto de pares ordenados de pontos.
    {
Series3->AddXY(Raiomedio[x], arvores1[x], "",clGreen); //Marca cada
//ponto do gráfico gerado por essa ferramenta gráfica.
    }
}
if(RadioButton7->Checked==true)
// Bloco de comandos que é executado
//se o usuário selecionar essa ferramenta gráfica
{
// Bloco que desleciona qualquer uma das demais ferramentas gráficas
//selecionadas anteriormente
    RadioButton2->Checked=false;
```

```
RadioButton1->Checked=false;
RadioButton4->Checked=false;
RadioButton5->Checked=false;
RadioButton6->Checked=false;
RadioButton3->Checked=false;

// "Limpa" o gráfico que estiver na tela antes de desenhar o novo
//gráfico
Series1->Clear();
Series2->Clear();
Series3->Clear();

    for (x =0; x<=npassos; x++)// Estrutura de repetição que
//desenha o gráfico gerado por essa ferramenta, a partir de um
//conjunto de pares ordenados de pontos.
    {

Series3->AddXY(Raiomedio[x], arvores2[x], "",clYellow); //Marca cada
//ponto do gráfico gerado por essa ferramenta gráfica.
    }
}

if(RadioButton3->Checked==true) // Bloco de comandos que é executado
//se o usuário selecionar essa ferramenta gráfica

{
// Bloco que desleciona qualquer uma das demais ferramentas gráficas
//selecionadas anteriormente
RadioButton2->Checked=false;
RadioButton1->Checked=false;
RadioButton4->Checked=false;
RadioButton5->Checked=false;
RadioButton6->Checked=false;
RadioButton7->Checked=false;

// "Limpa" o gráfico que estiver na tela antes de desenhar o novo
//gráfico
Series1->Clear();
Series2->Clear();
Series3->Clear();

    for (x =0; x<=npassos; x++)// Estrutura de repetição que
//desenha o gráfico gerado por essa ferramenta, a partir de um
//conjunto de pares ordenados de pontos.
    {
        Series3->AddXY(Raiomedio[x], x, "",clBlack);
    }
}
```

É de extrema importância para a implementação das diversas ferramentas de medidas a introdução de um método que detecte automaticamente a fronteira de fogo, ou seja, quais árvores estão compondo os extremos da região incendiada. Para isso, um eficiente método de identificação de bordas deve ser utilizado, de forma que o maior número de árvores pertencentes a essa fronteira seja identificado. Elaborou-se, então um algoritmo cujo resultado se mostrou bastante satisfatório e que se caracteriza, essencialmente, por

percorrer a matriz de árvores modeladas, horizontalmente, linha por linha, e verticalmente, coluna por coluna, a partir das extremidades até encontrar uma árvore incendiada e marcá-la como integrante da borda. Para uma melhor compreensão do algoritmo implementado, apresenta-se, seus princípios, passo a passo, no quadro a seguir:

1. Após a simulação, percorremos a matriz "A" associada a cada entidade da, armazenando em outra matriz "s", de dimensão 600 x 600, os valores finais dos elementos de "A", que indicam se cada entidade corresponde a uma árvore já queimada, em chamas ou a uma região sem árvore.
2. Dividir a floresta modelada em quatro quadrantes de acordo com a figura 2 e executar os seguintes passos:

- percorrer, linha por linha, da esquerda pra direita e coluna por coluna, de cima para baixo, o trecho da matriz "s" composto pelos elementos associados ao primeiro quadrante da floresta. Devemos marcar como componente da borda, todo elemento que corresponda a uma árvore incendiada antecedido por outro que não corresponda a uma árvore incendiada.
- percorrer, linha por linha, da direita pra esquerda e coluna por coluna, de cima para baixo, o trecho da matriz "s" composto pelos elementos associados ao segundo quadrante da floresta. Devemos marcar como componente da borda, todo elemento que corresponda a uma árvore incendiada antecedido por outro que não corresponda a uma árvore incendiada.
- percorrer, linha por linha, da esquerda pra direita e coluna por coluna, de baixo para cima, o trecho da matriz "s" composto pelos elementos associados ao terceiro quadrante da floresta. Devemos marcar como componente da borda, todo elemento que corresponda a uma árvore incendiada antecedido por outro que não corresponda a uma árvore incendiada.
- percorrer, linha por linha, da direita pra esquerda e coluna por coluna, de baixo para cima, o trecho da matriz "s" composto pelos elementos associados ao quarto quadrante da floresta. Devemos marcar como componente da borda, todo elemento que corresponda a uma árvore incendiada antecedido por outro que não corresponda a uma árvore incendiada.

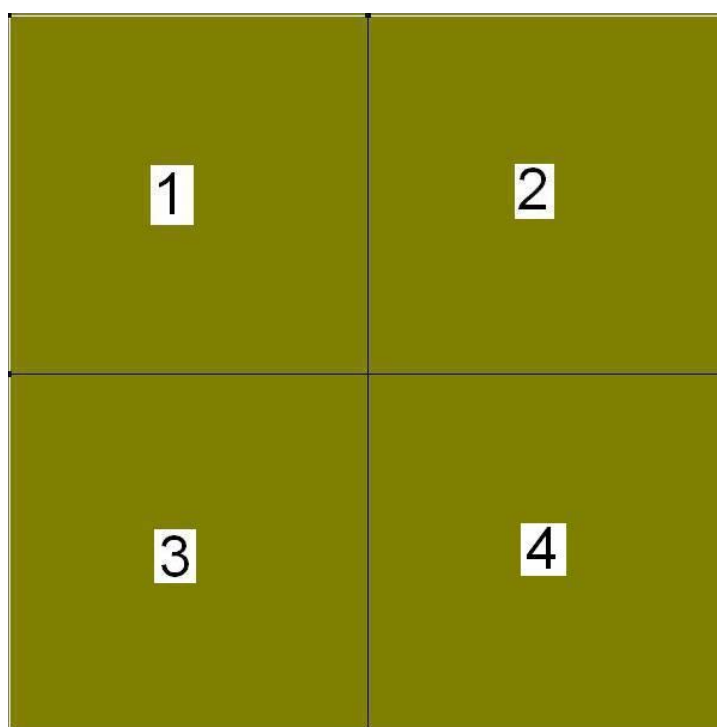


Figura 2.5: Imagem do objeto “Vegetação” que representa a floresta modelada, dividido em quatro quadrantes.

A seguir o trecho principal do algoritmo responsável por detectar a fronteira entre a região do fogo e do restante da floresta. Denominou-se esta de “detecção de bordas da fronteira”:

```
for(x=0;x<=600;x++) // Zera a matriz "s" e a matriz "D"
{
    for(y=0;y<=600;y++)
    { s[x][y]=0;
      D[x][y]=0;
    }
}

// Percorre a matriz "A", atribuindo aos elementos
//correspondente de "s", o valor 0 para árvores as regiões se árvores
//ou árvores não incendiadas, o valor 1 para árvores queimadas, e o
//valor 2 para as árvores que ainda estavam em processo de queima no
//momento que a simulação foi finalizada
for (x=0;x<(Vegetacao->Width-1);x++)
{
    for(y=0;y<(Vegetacao->Height-1);y++)
    {
        if (A[x][y]==1 || A[x][y]==3 || A[x][y]==0)
            s[x][y]=0;
        if (A[x][y]==2 && Temperatura[x][y]<=Tig1)
            s[x][y]=1;
        if (A[x][y]==2 && Temperatura[x][y]>Tig1)
            s[x][y]=2;
    }
}
```

```
    }  
}  
  
int xcentro=x0; // Atribui à variável xcentro o valor da  
//cordenada do eixo das abcissas do ponto central da matriz de que  
//representa a floresta  
  
int ycentro=y0; // Atribui à variável xcentro o valor da  
//cordenada do eixo das ordenadas do ponto central da matriz de que  
//representa a floresta  
  
//Percorre, linha por linha, da esquerda pra direita, o trecho da  
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao primeiro  
//quadrante da floresta e marca o elemento como integrante da  
//fronteira  
for (y=0;y<=xcentro;y++)  
{  
    for (x=0;x<=ycentro;x++)  
    {  
        {  
            if (s[x][y]==0 && (s[x+1][y]==2 || s[x+1][y]==1) )  
            {  
                D[x+1][y]=1;  
                goto salto1;  
            }  
        }  
    }  
  
salto1:  
}  
  
//Percorre, coluna por coluna, de cima para baixo, o trecho da  
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao primeiro  
//quadrante da floresta marca o elemento como integrante da fronteira  
for (x=0;x<=ycentro;x++)  
{  
    for (y=0;y<=xcentro;y++)  
    {  
        {  
            if (s[x][y]==0 && (s[x][y+1]==2 || s[x][y+1]==1))  
            {  
                D[x][y+1]=1;  
                goto salto2;  
            }  
        }  
    }  
  
salto2:  
}  
  
//Percorre, linha por linha, da direita pra esquerda, o trecho da  
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao segundo quadrante  
//da floresta marca o elemento como integrante da fronteira.  
for (y=Vegetacao->Height-1;y>=xcentro;y--)  
{  
    for (x=0;x<=ycentro;x++)  
    {  
        {  
            if (s[x][y]==0 && (s[x+1][y]==2 || s[x+1][y]==1))  
            {  
                D[x+1][y]=1;  
                goto salto3;  
            }  
        }  
    }  
  
salto3:  
}  
  
//Percorre, coluna por coluna, de cima para baixo, o trecho da matriz
```

```
//"s" composto pelos elementos associados ao segundo quadrante da
//floresta e marca o elemento como integrante da fronteira.
for (x=0;x<=ycentro;x++)
{
    for (y=Vegetacao->Height-1;y>xcentro;y--)
    {
        {
            if (s[x][y]==0 && (s[x][y-1]==2||s[x][y-1]==1))
            {
                D[x][y-1]=1;
                goto salto4;
            }
        }
    }
salto4:
}

//Percorre, linha por linha, da esquerda pra direita, o trecho da
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao terceiro
//quadrante da floresta marca o elemento como integrante da fronteira
for (y=0;y<=xcentro;y++)
{
    for (x=Vegetacao->Width-1;x>=ycentro;x--)
    {
        {
            if (s[x][y]==0 && (s[x-1][y]==2||s[x-1][y]==1))
            {
                D[x-1][y]=1;
                goto salto5;
            }
        }
    }
salto5:
}

//Percorre, coluna por coluna, de baixo para cima, o trecho da
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao terceiro
//quadrante da floresta e marca o elemento como integrante da
//fronteira
for (x=ycentro;x<=Vegetacao->Width-1;x++)
{
    for (y=0;y<=xcentro;y++)
    {
        {
            if (s[x][y]==0 && (s[x][y+1]==2||s[x][y+1]==1))
            {
                D[x][y+1]=1;
                goto salto6;
            }
        }
    }
salto6:
}

//Percorre, linha por linha, da direita pra esquerda, o trecho
//da matriz "s" composto pelos elementos associados ao quarto
//quadrante da floresta e marca o elemento como integrante da
//fronteira.
for (y=Vegetacao->Height-1;y>=xcentro;y--)
{
    for (x=Vegetacao->Width-1;x>=ycentro;x--)
    {
        {
            if (s[x][y]==0 && (s[x-1][y]==2||s[x-1][y]==1))
            {
                D[x-1][y]=1;
                goto salto7;
            }
        }
    }
salto7:
}
```

```
//Percorre, coluna por coluna, de baixo para cima, o trecho da
//matriz "s" composto pelos elementos associados ao quarto quadrante
//da floresta e marca o elemento como integrante da fronteira.
for (x=Vegetacao->Width-1;x>=ycentro;x--)
{
    for (y=Vegetacao->Height-1;y>xcentro;y--)
    {
        if (s[x][y]==0 && (s[x][y-1]==2 || s[x][y-1]==1))
        {
            D[x][y-1]=1;
            goto salto8;
        }
    }
    salto8:
}
```

2.2.7. Medida da dimensão fractal

Definida a fronteira do fogo, pode-se associar à imagem final da floresta incendiada um parâmetro que, além de fornecer informações sobre a dinâmica do fogo, pode funcionar como referência para o estabelecimento de uma conexão entre aspectos geométricos do modelo proposto com aqueles extraídos de uma imagem real de incêndios florestais: a dimensão fractal. Fractal é uma forma geométrica, de aspecto irregular ou fragmentado que pode ser subdividido indefinidamente em partes, as quais de certo modo, são cópias reduzidas do todo (FERREIRA, 1999). Ou seja, os fractais têm muitos detalhes e são geralmente auto-similares em diferentes níveis de escala (PEITGEN, 1986; RICHTER, 1986). Sabe-se também, que fractais são objetos que apresentam ramificações, rugosidades ou porosidades em todas as escalas de comprimento (REIS, 2001).

Na matemática, a geometria euclidiana trata das propriedades e medidas da extensão dos objetos em dimensões bem definidas (uma, duas ou três) baseadas nos postulados do matemático grego Euclides, enquanto que a geometria fractal estuda as propriedades e comportamento dos fractais, permitindo a descrição de muitos fenômenos naturais que a geometria euclidiana não explica facilmente, como nuvens, montanhas, turbulências, crescimento de populações, árvores, e outras formas irregulares (SIQUEIRA, 2006). Ao contrário do que é observado na geometria euclidiana, em que o número de direções independentes, ou o número mínimo de coordenadas necessárias para localizar um ponto, já representa a dimensionalidade do espaço em que dado objeto está inserido, a geometria fractal considera também o nível de irregularidade de uma figura (BACKES, 2005; BRUNO, 2005). Das características que definem um fractal, a mais importante é justamente a dimensão fractal (BACKES, 2005; BRUNO, 2005). Essa se caracteriza por indicar o nível de ocupação do espaço por formas geométricas irregulares e não todo espaço onde a forma está inserida, o que permite à dimensão fractal assumir valores fracionários (BACKES,

2005;BRUNO,2005).Dentre os vários métodos de estimativa da dimensão fractal existentes na literatura atual escolhemos o denominado *Box Counting* ou contagem de caixas, devido à sua simplicidade e facilidade de implementação. Essencialmente, o método consiste em sobrepor à imagem uma malha de quadrados e contar o número de quadrados necessários para cobrir toda a forma (BACKES, 2005;BRUNO,2005). O algoritmo que implementa o método de contagens de caixas está descrito a seguir:

O método utilizado para determinar a dimensão fractal dos objetos foi o da contagem de caixas, a partir de um algoritmo que consiste no seguinte:

- a) Determinar um pixel central
- b) Determinar uma região quadrada de (n x n) pixels que envolve o centro, conhecida como caixa.
- c) Contar quantos pixels estão "preenchidos", ou seja, representam árvores incendiadas.
- d) Criar um par ordenado (x,y) de pontos, onde x é a distância "r" entre o centro e um dos lados do quadrado, e y é o número "M" de pixels "preenchidos".
- e) Aumentar a distância r, progressivamente, até a uma caixa conter todo o fogo.
- f) Armazenar os valores de cada par ordenado (r,M).
- g) Calcular a dimensão fractal, através da relação:

$$D = \frac{\sum x \sum y - N \sum xy}{(\sum x)^2 - N \sum x^2} \quad (12)$$
, onde N é o número de caixas utilizadas, x é logaritmo de r na base 10 e y é o logaritmo de M na base 10.

Podemos deduzir esta relação através dos seguintes passos:

a) Perceber que existe uma relação exponencial entre M e r, do tipo: $M = Ar^D$ (13), este D é a nossa dimensão fractal.

b) Reduzir esta relação exponencial para uma linear, através do desenvolvimento a seguir:

$$M = Ar^D \quad (14)$$

$$\log M = \log Ar^D \quad (15)$$

$$y = \log A + \log r^D \quad (16)$$

$$y = B + D \log r \quad (17)$$

$$y = B + Dx \quad (18)$$

c) Perceber que chegamos à equação da reta e que D é o coeficiente angular da reta: $D = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ (19).

d) Esboçar o gráfico da reta e obter D , porém devido ao efeito de borda, o gráfico difere de uma reta e a conexão dos pontos obtidos nos revela inúmeras retas possíveis, então realizamos um ajuste linear para obtermos o coeficiente angular da reta mais representativa. Os passos estão apresentados a seguir:

$$\text{para o ponto 1: } y_1 = Dx_1 + B \quad (20);$$

$$\text{para o ponto 2: } y_2 = Dx_2 + B \quad (21);$$

$$\text{para o ponto 3: } y_3 = Dx_3 + B \quad (22);$$

$$\text{para o ponto n: } y_n = Dx_n + B \quad (23);$$

...

Realizando a soma: $\sum y = \sum Dx + NB$ (24).

Temos uma equação e duas incógnitas ("D" e "B"). Obtemos outra equação multiplicando as equações dos pontos por x :

$$\text{para o ponto 1: } x_1 y_1 = Dx_1^2 + Bx \quad (25);$$

$$\text{para o ponto 2: } x_2 y_2 = Dx_2^2 + Bx \quad (26);$$

$$\text{para o ponto 3: } x_3 y_3 = Dx_3^2 + Bx \quad (27);$$

...

$$\text{para o ponto n: } x_n y_n = Dx_n^2 + Bx \quad (28);$$

Realizando a soma: $\sum xy = D\sum x^2 + B\sum x$ (29).

Temos duas equações:

$$\sum y = \sum Dx + NB \quad (30)$$

$$\sum xy = D\sum x^2 + B\sum x \quad (31)$$

E precisamos encontrar:

B=?

D=?

Resolvendo para as equações 30 e 31,

Para implementar os métodos estatísticos, que caracterizam o segundo grupo de ferramentas de medidas, desenvolveu-se um *software* que realiza várias vezes a simulação de incêndios, porém sem apresentar visualmente a expansão fogo na tela. O *software* armazena os resultados em variáveis, extraindo as informações consideradas importantes, como o número de árvores queimadas e em chamas, número de árvores do tipo 1 e 2, o raio médio da região incendiada e a dimensão fractal. Depois de realizada o número de simulações definido pelo usuário, o *software* apresenta na tela a média e o desvio padrão de cada uma dessas variáveis. Além do número de simulações, o usuário pode definir a quantidade de passos a ser realizado pela máquina (tempo total da evolução do incêndio), a cada simulação. Pode-se observar a interface do *software* na Figura 2.6.



Figura 2.6: Tela da interface do usuário do *software* com as ferramentas estatísticas. As imagens da simulação não são mostradas, apenas os valores médios e desvios padrão de cada parâmetro.

Para desenvolver o *software* de análise estatística se realizou algumas alterações no programa de simulação de incêndios original. Essencialmente, reuniu-se as diversas etapas da simulação e se definiu que seriam realizadas em um evento só, ou seja, a plantação de árvores, a introdução da foco inicial de calor e a expansão do fogo, ocorreriam em uma seqüência automática após o clique em um botão. Além disso, se criou um laço que executa várias vezes a simulação. Retirou-se os comandos responsáveis pela representação gráfica da expansão do fogo na tela e se extraíram as informações necessárias para o cálculo da média e desvio padrão de cada grandeza estudada.

A seguir o algoritmo usado para o desenvolvimento da ferramenta de análise estatística dos resultados.

1. Plantar árvores dos dois tipos, conforme realizamos anteriormente
2. Introduzir a foco inicial de calor do fogo, sempre no mesmo local
3. Realizar N repetições dos passos abaixo:
 - a. Executar a simulação da propagação do fogo
 - Ao fim de cada simulação:
 - capturar o valor de cada parâmetro a ser avaliado.
 - Somar o valor do parâmetro com os valores desses nos passos anteriores, ou seja, acumular em variáveis o valor desses parâmetros.
 - Somar o valor do quadrado de cada parâmetro com os valores dos quadrados desses nos passos anteriores, ou seja, acumular em variáveis o valor do quadrado desses parâmetros.
 - Depois de realizadas todas as simulações:
 - Calcular a média de cada parâmetro.
 - Calcular a média do quadrado dos parâmetros nos passos anteriores, ou seja, acumular em variáveis o valor desses parâmetros.
 - Calcular o desvio padrão através da fórmula: $DP = \sqrt{E(x^2) - (E(x))^2}$.
 - Apresentar na tela os resultados obtidos da média e desvio padrão para cada parâmetro.

Apresenta-se, no próximo quadro, a transcrição do trecho do programa para o desenvolvimento da ferramenta de análise estatística, responsável pela extração da média e desvio padrão para cada parâmetro.

```
DF=Df; // Armazena o valor da dimensão fractal ao fim de cada
//simulação

EMCHAMAS = emchamas[npassos]; // Armazena o valor do número de
//árvores ainda em chamadas ao fim de cada simulação

QUEIMADAS = queimadas[npassos]; ]; // Armazena o valor do número de
//árvores queimadas ao fim de cada simulação

ARVORES1= arvores1[npassos]; ]; // Armazena o valor do número de
//árvores do tipo 1 ao fim de cada simulação

ARVORES2= arvores2[npassos]; ]; // Armazena o valor do número de
//árvores do tipo 2 ao fim de cada simulação

RAIOMEDIO = Raiomedio[npassos]; ]; // Armazena o valor do raio médio
//da região incendiada ao fim de cada simulação

SOMADF=SOMADF + DF; // Acumula o valor da dimensão fractal,
//somando o valor obtido ao fim de uma simulação com os demais
//obtidos ao fim das simulações anteriores

SOMAEMCHAMAS= SOMAEMCHAMAS +EMCHAMAS; // Acumula o
//valor do número de árvores ainda em chamadas, somando o valor obtido
//ao fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das simulações
//anteriores

SOMAQUEIMADAS= SOMAQUEIMADAS +QUEIMADAS; // Acumula o
//valor do número de árvores queimadas, somando o valor obtido ao fim
//de uma simulação com os demais obtidos ao fim das simulações
//anteriores

SOMAARVORES1= SOMAARVORES1 +ARVORES1; // Acumula o
//valor do número de árvores do tipo 1, somando o valor obtido ao fim
//de uma simulação com os demais obtidos ao fim das simulações
//anteriores

SOMAARVORES2= SOMAARVORES2 + ARVORES2; // Acumula o
//valor do número de árvores do tipo 2, somando o valor obtido ao fim
//de uma simulação com os demais obtidos ao fim das simulações
//anteriores

SOMARAIOMEDIO= SOMARAIOMEDIO + RAIOMEDIO; // Acumula o
//valor do raio médio da região queimada, somando o valor obtido ao
//fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das simulações
//anteriores

SOMADF2=SOMADF2+DF*DF; // Acumula o valor do quadrado da
//dimensão fractal, somando o valor obtido ao fim de uma simulação
//com os demais obtidos ao fim das simulações anteriores

SOMAEMCHAMAS2=SOMAEMCHAMAS2 +EMCHAMAS*EMCHAMAS; //Acumula o valor do
```

```
//quadrado do número de árvores ainda em chamas, somando o valor
//obtido ao fim de uma simulação com os demais obtidos //ao fim das
//simulações anteriores

SOMAQUEIMADAS2=SOMAQUEIMADAS2+QUEIMADAS*QUEIMADAS; //Acumula o valor
//do quadrado do número de árvores queimadas, somando o valor obtido
//ao fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das
//simulações anteriores

SOMAARVORES12= SOMAARVORES12 +ARVORES1*ARVORES1; //Acumula o valor do
//quadrado do número de árvores do tipo 1, somando o valor obtido ao
//fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das //simulações
//anteriores
SOMAARVORES22= SOMAARVORES22 + ARVORES2*ARVORES2; //Acumula o valor
//do quadrado do número de árvores do tipo 2, somando o valor obtido
//ao fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das
//simulações ante

SOMARAIOMEDIO2=SOMARAIOMEDIO2 + RAIOMEDIO*RAIOMEDIO; //Acumula o
//valor do quadrado do raio médio da região queimada, somando o valor
//obtido ao fim de uma simulação com os demais obtidos ao fim das
//simulações anteriores

//fim do laço
}

MEDIADF = SOMADF/vezes; // Calcula a média da dimensão fractal
MEDIAEMCHAMAS = SOMAEMCHAMAS/vezes; // Calcula a média do
//número de árvores em chamas
MEDIAQUEIMADAS = SOMAQUEIMADAS/vezes; // Calcula a média
//do número de árvores queimadas
MEDIAARVORES1 =SOMAARVORES1/vezes; // Calcula a média do
//número de árvores do tipo 1
MEDIAARVORES2 = SOMAARVORES2/vezes; // Calcula a média do
//número de árvores do tipo 2
MEDIARAIOMEDIO = SOMARAIOMEDIO/vezes; // Calcula a média do
//raio médio da região incendiada

float MEDIADF2 = SOMADF2/vezes; // Calcula a média do quadrado do
//número de árvores em chamas do quadrado

float MEDIAEMCHAMAS2 = SOMAEMCHAMAS2/vezes; ; // Calcula a
//média do quadrado do número de árvores em chamas

float MEDIAQUEIMADAS2 = SOMAQUEIMADAS2/vezes; // Calcula a
//média do quadrado do número de árvores queimadas

float MEDIAARVORES12 =SOMAARVORES12/vezes; // Calcula a
//média do quadrado do número de árvores do tipo 1

float MEDIAARVORES22 = SOMAARVORES22/vezes; // Calcula a
//média do quadrado do número de árvores do tipo 2

float MEDIARAIOMEDIO2 = SOMARAIOMEDIO2/vezes; // Calcula a
//média do quadrado do raio médio da região incendiada

DPDF = sqrt(MEDIADF2-MEDIADF*MEDIADF); // Calcula o desvio padrão do
//número de árvores em chamas do quadrado
```

```
DPEMCHAMAS=sqrt (MEDIAEMCHAMAS2-MEDIAEMCHAMAS*MEDIAEMCHAMAS) ;  
// Calcula o desvio padrão do número de árvores em chamadas  
  
DPQUEIMADAS=sqrt (MEDIAQUEIMADAS2-MEDIAQUEIMADAS*MEDIAQUEIMADAS) ;  
// Calcula o desvio padrão do número de árvores em chamadas  
  
DPAARVORES1=sqrt (abs (MEDIAARVORES12-MEDIAARVORES1*MEDIAARVORES1)) ;  
// Calcula a o desvio padrão do número de árvores do tipo 1  
  
DPAARVORES2=sqrt (abs (MEDIAARVORES22-MEDIAARVORES2*MEDIAARVORES2)) ;  
// Calcula o desvio padrão do número de árvores do tipo 2  
  
DPRAIOMEDIO=sqrt (MEDIARAIO2-MEDIARAIO*MEDIARAIO) ;  
// Calcula o desvio padrão do raio médio da região incendiada
```

2.2.8. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE QUE REÚNE O SIMULADOR DE INCÊNDIOS EM FLORESTAS E FERRAMENTAS DE MEDIDAS

Para propiciar uma melhor utilização do modelo desenvolvido e otimizar os resultados obtidos, reuniu-se o simulador de incêndios em florestas e ferramentas de medidas implementadas em um único *software*, que através de recursos didáticos e ferramentas de fácil utilização, permite ao usuário definir, de forma simples, características da simulação, como as suas condições iniciais e sua duração, além de propiciar uma melhor extração de resultados. Pode-se observar na Figura 2.7, o *layout* do programa. Da Figura 2.8 à Figura 2.12, visualizar-se de forma destacada cada grupo de objetos que integram o *software*. Com base nessas figuras, será realizada uma apresentação do programa, recurso por recurso, seguida de orientações sobre sua utilização.

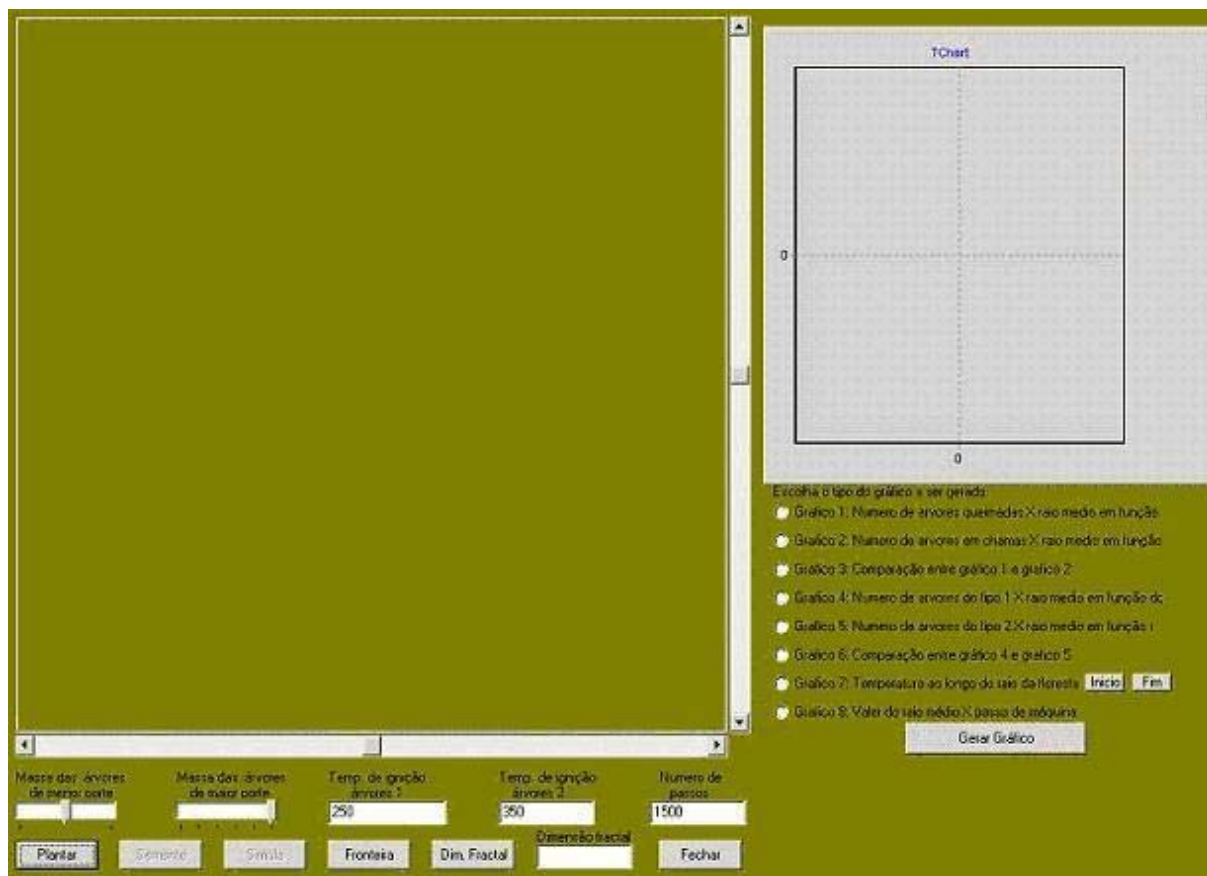


Figura 2.7: Imagem reduzida do *software* que simula incêndios em florestas.

Ao executar o software o usuário visualizará uma imagem igual à apresentada na Figura 2.7. Na Figura 2.8, pode-se visualizar ferramentas que permitem ao usuário definir valores de grandezas e características da simulação. Nas duas primeiras, podemos definir a faixa de variação do tempo de queima para cada tipo de árvore. Através da terceira e quarta ferramenta se pode determinar qual o valor da temperatura de ignição das árvores do tipo 1 e 2, respectivamente. Por fim, na quinta é definido o número de passos da simulação. Outra condição inicial ainda pode ser definida, a direção e intensidade dos ventos. Para isso, basta o usuário definir os valores das componentes horizontais e verticais do vento, que estão associados à posição das barras de rolagem, que podem ser visualizadas na Figura 2.9.

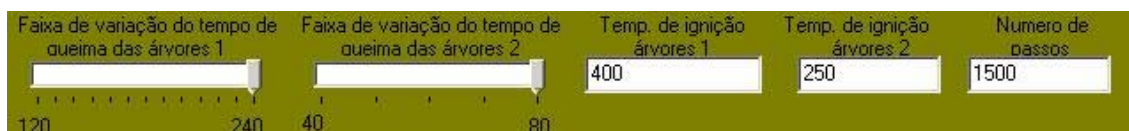


Figura 2.8: Imagem dos objetos que definem características da simulação e valores de parâmetros.

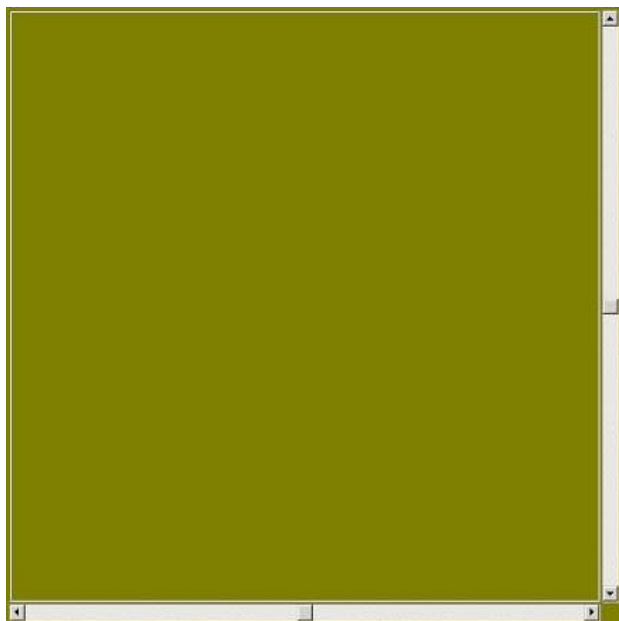


Figura 2.9: Imagem do objeto onde será realizada a visualização da simulação, porém diferentemente do que se apresenta na Figura 1, aqui podemos visualizar duas barras de rolagem que estão relacionadas com o efeito da ação e direção do vento.

Na Figura 2.10, pode-se visualizar os botões que executam os eventos básicos necessários para o início da simulação e para a extração de resultados. Ao clicar no botão denominado “Plantar”, a floresta modelada composta por árvores do tipo 1 e 2 e por regiões sem árvores, surge na tela. Após a plantação, o botão denominado “Fogo” é habilitado e ao clicá-lo, um foco central de incêndio é criado, pois a árvore que se localiza no centro pega fogo. O usuário pode escolher a localização dessa foco inicial de calor, dando um duplo clique em qualquer ponto da floresta. A simulação é iniciada após o clique no botão “Simular”. Ao fim da simulação, o usuário pode visualizar a borda da região queimada através do clique no botão “Fronteira” e também escolher o tipo de gráfico que deseja analisar, através da seleção de uma das opções existentes, apresentada na Figura 11. Escolhido o gráfico, deve-se clicar no botão denominado gerar gráfico. Esse surgirá na tela na região indicada pela Figura 2.12.



Figura 2.10: Imagem dos botões que compõem o *software*. Ao *click* simples, cada um executa um evento específico.

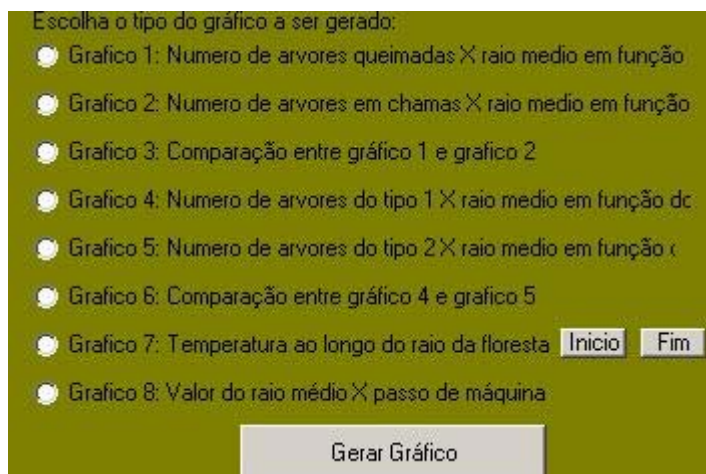


Figura 2.11: A caixa de seleção de gráficos a serem apresentados para o usuário através da seleção de uma das opções.

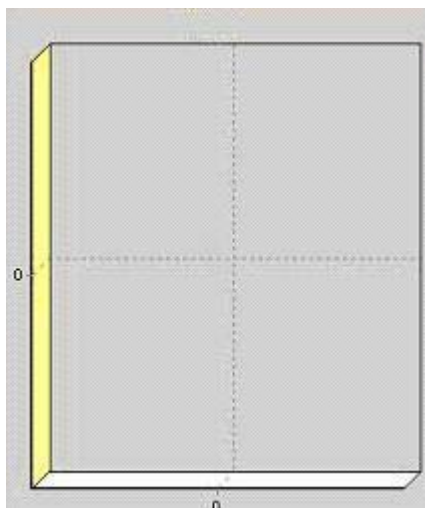


Figura 2.12: Local em que os gráficos serão apresentados.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O acompanhamento visual da simulação demonstra um bom realismo para quem já viu o espalhamento de fogo em plantas, mesmo de pequenas proporções como fogo rasteiro em grama seca. A dificuldade em comparar diretamente as imagens de fogo em grandes árvores e as simulações que serão apresentadas nesta seção é a grande quantidade de fumaça produzida no incêndio real em floresta, aqui eliminamos esse elemento que não foi modelado.

2.3.1. A EVOLUÇÃO DE ÁREAS DEMARCADAS PELO FOGO

O fogo é resultado de uma transformação química que muda, entre outras coisas, a vida por onde passa. Deste ponto de vista se divide as áreas de uma floresta em basicamente: verde (árvores não queimadas), em chamas e queimada (em cinzas). Sem vento ou outras condições que quebrem a simetria, o fogo tende a se espalhar circunsimetricamente. Observa-se, normalmente, que o fogo deixa uma crescente área queimada rodeada por um anel de chamas que avança sobre a área ainda não queimada, como ilustrado na Figura 2.13. Também é comum observar que o anel de chamas não aumenta nem diminui a sua largura média. No entanto, no início do espalhamento, não haverá área queimada, só a área em chamas dominará até atingir a largura média característica.

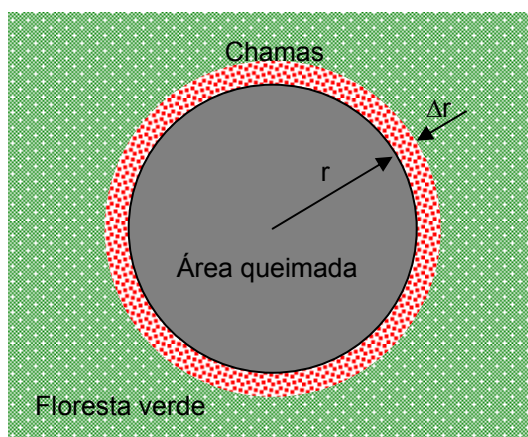


Figura 2.13: Áreas modificadas pelo fogo (queimada ou em chamas) e área ainda não queimada (floresta verde).

A dinâmica das mudanças dessas áreas pode dar uma idéia de quantas árvores estão queimando naquele momento, quantas já estão queimadas e quantas queimarão no momento seguinte. Embora o anel de fogo não sofra alteração na sua largura média, o número de árvores em chamas aumenta à medida que o diâmetro do anel cresce. Esse fator é importante para indicar, por exemplo, a quantidade de água necessária para apagar um incêndio. A área queimada cresce como a área de um círculo, dependência quadrática com o raio da área queimada,

$$A_q = \pi r^2 \quad (37)$$

Enquanto a área do anel de fogo cresce como, dependência linear com o raio da área queimada,

$$A_f = 2\pi r \Delta r + \pi(\Delta r)^2 \quad (38)$$

Em um determinado momento, o número de árvores em chamas é o mesmo de árvores queimadas, como ilustrado no gráfico da Figura 2.14. Esse momento ocorre quando o raio da área queimada atingir o valor crítico de duas vezes a largura da faixa em chamas, $r_c = (1 + \sqrt{2})\Delta r$, portanto a área queimada igual a área em chamas, $A_q = A_f = A_c$, terá o valor crítico de $A_c = (1 + \sqrt{2})^2 \pi(\Delta r)^2$.

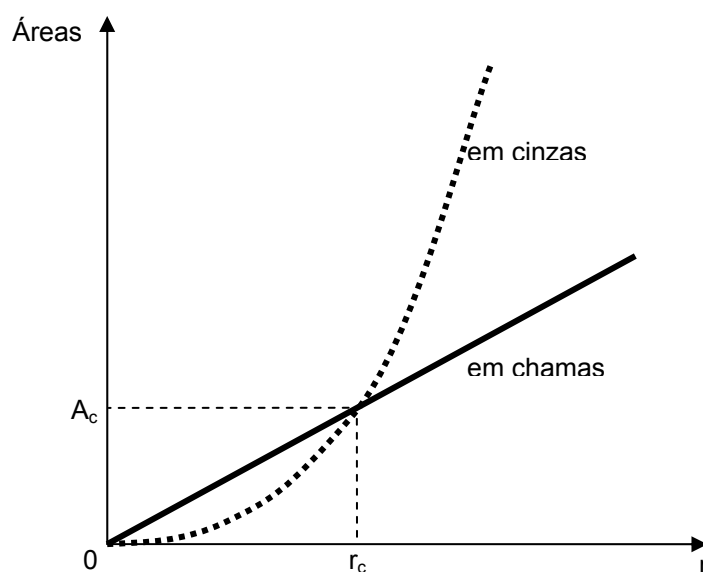


Figura 2.14: Evolução das áreas ou números de árvores queimadas e em chamas.

Se houver condições propícias para alimentar o fogo, a área de árvores queimadas cresce fortemente, como pode ser visto pelo gráfico da Figura 2.14. O momento de maior concentração de fogo se dá no início do processo quando ainda não existem árvores queimadas. Nesse momento o fogo está todo concentrado numa área aproximadamente circular de raio igual à largura da faixa de fogo, Δr , sem áreas de esfriamento ou de cinzas, com as chamas em plena atividade.

Os testes realizados com o algoritmo proposto apresentam essas características, como podem ser visualizados pelo gráfico da Figura 2.15. As distorções apresentadas pelo gráfico da figura 2.15 com relação ao gráfico da Figura 2.14, devem-se ao caráter irregular que a fronteira de fogo, faixa de chamas, desenvolve na dinâmica de propagação, o que se aproxima da situação real encontrada na natureza.

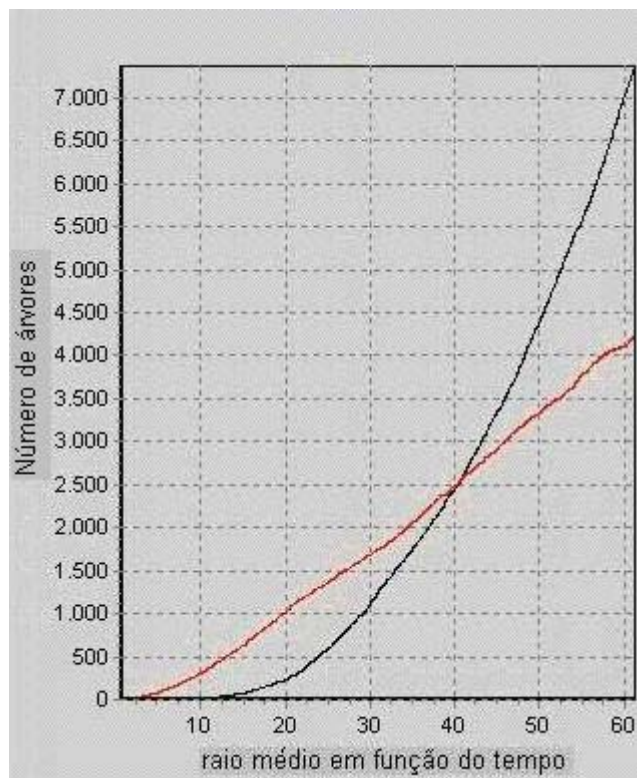


Figura 2.15: Evolução do número de árvores queimadas e em chamas durante uma simulação. A exemplo do gráfico teórico, há um ponto onde os dois gráficos se encontram.

2.3.2. DIFERENTES TIPOS DE ÁRVORES

A diferença básica entre árvores está na temperatura de ignição para início da combustão. Nos testes, implementaram-se apenas dois tipos de árvores. Os valores mais utilizados de temperatura de ignição foram: $T_{ig} = 250^{\circ}\text{C}$ (pontos verde escuro) e $T_{ig} = 400^{\circ}\text{C}$ (pontos verdes claro). O número de árvores não atingidas pelo fogo em função do raio médio da região incendiada a cada instante de tempo cai nitidamente de forma mais rápida para árvores de temperatura de ignição maior, como mostrado no gráfico da Figura 2.16. Esse resultado óbvio esconde características coletivas, como o fato de as árvores mais resistentes retardarem a queima das árvores menos resistentes, isto é, existe um efeito interativo entre as curvas do gráfico da Figura 2.15.



Figura 2.16: Queda no número de árvores de cada tipo devido à destruição pelo fogo (em unidades computacionais de medida). O número de árvores de maior temperatura de ignição, representadas pela cor azul, cai mais lentamente.

O algoritmo de propagação do fogo segue modelos que configuram situações de percolação entre árvores diferentes. Pelas propriedades gerais de percolação a interrupção do fogo se daria na proporção de aproximadamente 40% de árvores imunes a fogo aleatoriamente misturadas às árvores que se incendiam facilmente, apenas com o contato. No entanto, até se lidando com situações intermediárias, em que se misturam árvores com dois tipos de suscetibilidades à queima. Se inserirmos de forma equitativa os dois tipos de árvores na floresta modelada, a partir da presença de 50% de árvores imunes o fogo não se espalha. Esse resultado sugere que se pode planejar uma floresta ou área de reflorestamento com maior imunidade à propagação de incêndios, se for possível fazer esse tipo de escolha. Essa possibilidade é especialmente importante em áreas muito secas, onde as condições ambientais podem provocar incêndios facilmente.

2.3.3. COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DE UM RAIÃO DA REGIÃO INCENDIADA

A análise de como se distribui a temperatura ao longo de um raio da região incendiada revelou um aspecto muito interessante: o comportamento é semelhante a uma distribuição gaussiana, ou seja, aquilo que se observa em relação à variação da temperatura em uma única árvore é característica também do conjunto de árvores que se distribuem ao longo do raio da região que pegou fogo. Pode-se observar esse resultado obtido através da Figura 2.17.

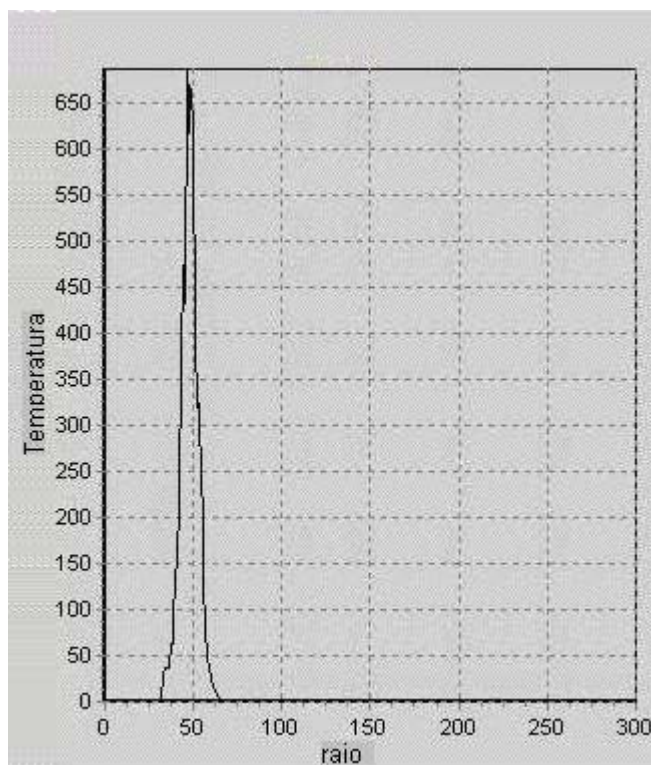


Figura 2.17: Apresenta como se distribui a temperatura ao longo de um raio da região incendiada (em unidades computacionais de medida). O gráfico lembra uma Gaussiana.

A largura da curva da Figura 2.17 está diretamente relacionada com a largura da faixa de fogo. Outro aspecto relevante desse estudo é que a ferramenta que acompanha essa distribuição, ou o pico da curva, ao longo do tempo revelou que o pico de temperatura movimenta-se no gráfico aproximadamente sobre uma linha reta horizontal.

2.3.4. FATORES DE ESCALA

Uma comparação importante de plausibilidade é o ajuste de escalas estáticas e dinâmicas entre a simulação e o fenômeno natural. A característica estática mais importante é a comparação entre pixels e o tamanho de árvores na floresta.

Estudos sobre a densidade de plantas na Amazônia têm sido focalizados principalmente sobre um grupo restrito de plantas: as árvores com troncos de diâmetro acima de 10 cm, medidos na altura média do peito de um homem. Em um hectare de floresta amazônica podem ser encontradas entre 400 e 750 árvores. Um estudo recente estimou que, na região do arco do desmatamento da Amazônia, o número de árvores em 1 km² de floresta está em torno de 50 mil (VIEIRA, 2005). Com base nesses dados aproximados, considerou-se que em média cada árvore tenha 2,5 metros (m) de raio, ou forme um quadrado de 5 m de lado, mais apropriado para a simetria plana da matriz de pixels da tela do computador. Essa é a dimensão que se pode usar como referência para cada pixel. A comparação é realizada juntamente com a escala dinâmica, envolvendo o tempo. Nesse caso podemos analisar a velocidade de propagação do fogo em uma floresta que é em torno de 1 m/min. Comparando com o número de pixels por passo (tempo artificial) de máquina, em torno de 40 pixels para cada 1000 passos, tem-se a correspondência de cada passo de máquina para cada 12 s ou 0,2 min. Passo de máquina nesse caso é a unidade de contagem de *loops* do programa para a simulação da propagação do fogo.

2.3.5. EFEITO DO VENTO

A introdução do método que simula o efeito do vento no modelo proposto, gerou resultados evidentes do ponto de vista visual, pois o formato da região incendiada é sensivelmente alterado, havendo uma projeção maior do fogo na direção e sentido do vento, considerando-se os mesmos valores para os demais parâmetros da simulação. Esse resultado pode ser observado na Figura 18. Porém, aspectos não tão evidentes, conseqüentes da ação do vento podem ser estudados a partir da comparação dos gráficos obtidos através de simulações com e sem presença de vento, como se visualiza nas Figuras 2.19 e 2.20.

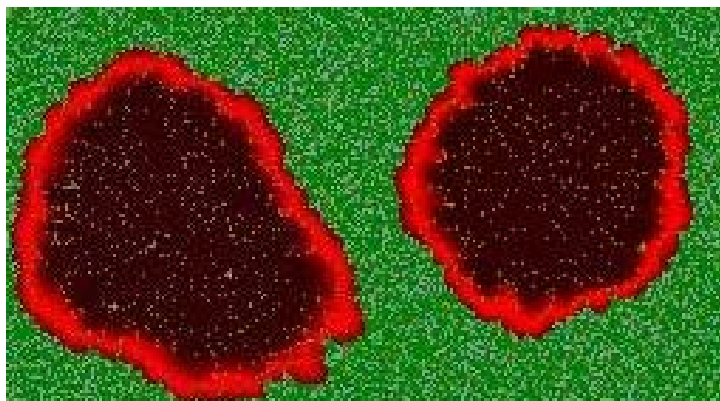


Figura 2.18: Alteração na forma da região incendiada causada pela ação do vento

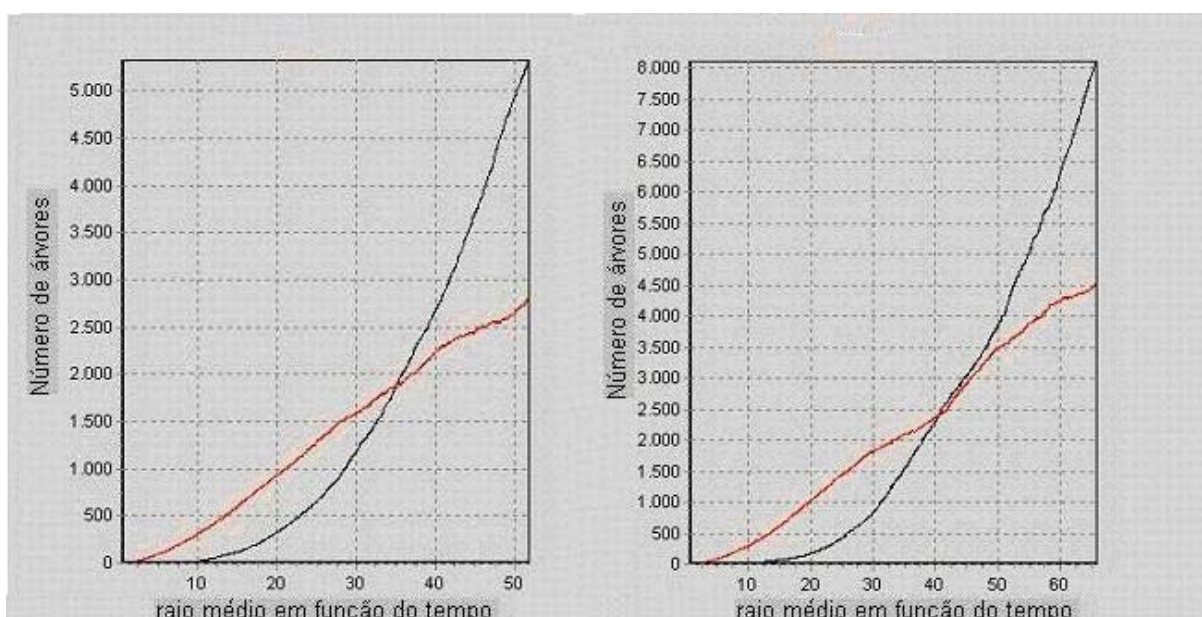


Figura 2.19: Imagem que ilustra alguns dos efeitos do vento não facilmente visualizados por nós, mas revelados pelo gráfico (em unidades computacionais de medida). Gráfico comparativo entre número de árvores em chamas (vermelho) e árvores queimadas (preto).

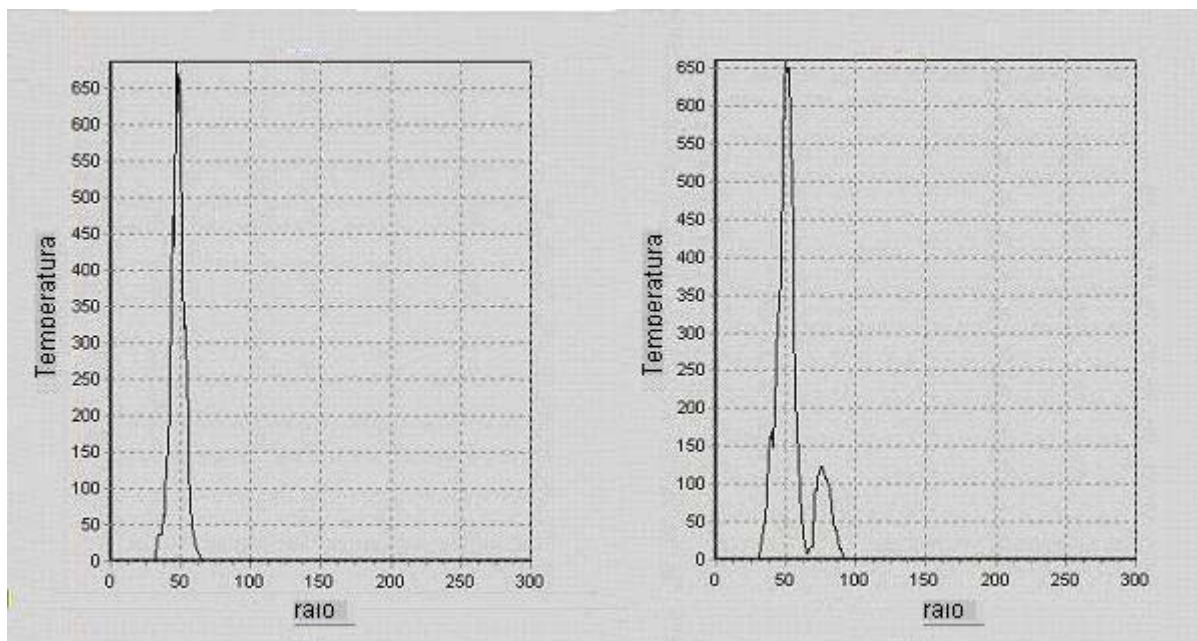


Figura 2.20: Imagem que ilustra alguns dos efeitos do vento não facilmente visualizados por nós, mas revelados pelo gráfico (em unidades computacionais de medida). Gráfico comparativo que apresenta como se distribui a temperatura ao longo de um raio da região incendiada.

Na Figura 2.20 à esquerda temos uma simulação sem vento, já na direita com vento. É nítido que o número de árvores em chamas e queimadas é maior na simulação com vento, assim como o raio médio da região incendiada. Na simulação com vento, as curvas se encontram um pouco depois. Já na Figura 19, a ação do vento gerou outro pico de temperatura, o que pode ser um parâmetro importante no estudo dos efeitos do vento no incêndio em floresta.

2.3.6. Característica fractal

O avanço da fronteira de fogo tem características geométricas de um fractal, como podemos ver na Figura 2.21.

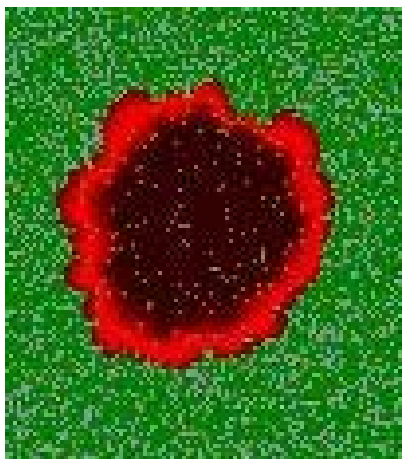


Figura 2.21: Imagem do avanço do fogo em floresta apresentando características fractais.

Criou-se uma ferramenta para a estimação da dimensão fractal das imagens do fogo geradas pela simulação. Utilizo-se o software que aplica métodos estatísticos para apresentar valores da dimensão fractal associado a determinadas configurações da simulação. Na Figura 2.22 visualiza-se a imagem de um trecho da ferramenta que realiza o cálculo da média da dimensão fractal e seu desvio padrão para as seguintes condições básicas (em unidades padrão do software):

- tempo de queima: 240 (120 min.)
- temperatura de ignição da árvore 1: 250 °C
- temperatura de ignição da árvore 2: 450 °C
- Sem efeito de ventos
- número de passos da simulação: 500
- número de simulações realizadas: 10

	Médias	Desvio padrão
Dimensão fractal	1,94138932228088	0,00871658604592085

Figura 2.22: Parte da interface gráfica da ferramenta estatística para análise de medidas obtidas no modelo proposto de propagação de florestas. Observa-se a dimensão fractal da imagem gerada por um incêndio simulado.

Como o esperado, este valor da dimensão fractal sofre variações devido à mudança na configuração dos parâmetros da simulação, porém é importante ressaltar o efeito do vento como fator preponderante para a variação da dimensão fractal. Observe os valores apresentados na Figura 2.23, após aplicar a ferramenta de análise estatística para uma simulação caracterizada pela mesma configuração dos valores dos parâmetros, exceto pelo fato de adicionarmos um vento forte em uma direção diagonal.

	Médias	Desvio padrão
Dimensão fractal	1,91222834587097	0,0109472554177046

Figura 2.23: Resultado da ferramenta estatística para análise de medidas obtidas com as simulações. Observa-se a dimensão fractal da imagem gerada por um incêndio considerando-se a ação do vento.

2.3.6.1. Valores dos parâmetros estudados

Após a aplicação do software desenvolvido para a introdução de métodos estatísticos sobre os resultados obtidos com o simulador de incêndios florestais, pode-se visualizar, na Figura 2.24, os valores médios, com respectivos desvios padrão, dos parâmetros estudados. Foram realizadas 50 simulações diferentes com duração de mil passos de máquina cada uma. Utiliza-se a seguinte configuração inicial:

- Porcentagem de árvores do tipo 1: 70%
- Porcentagem de árvores do tipo 2: 25%
- Tempo de queima de todas as árvores: 240 passos de máquina
- Temperatura de ignição das árvores tipo 1: 250 °C
- Temperatura de ignição das árvores tipo 2: 400 °C

	Médias	Desvio padrão
Insira o numero de passos	1000	
Insira o numero de simulações		50
Dimensão fractal	1,96668803691864	0,00424652732908726
Árvores em chamas	2030,85998535156	151,114730834961
Árvores queimadas	2493,580078125	298,163177490234
Árvores tipo 1	249468,5625	384,170532226563
Árvores tipo 2	89137,7578125	277,758880615234
Raio Médio	38,3982353210449	1,78188848495483

Calcular

Figura 2.24: Resultados obtidos pelo software que aplica métodos estatísticos sobre os valores dos parâmetros. À esquerda se tem a média e à direita, o desvio padrão dos valores de cada parâmetro.

A análise estatística dos resultados permite ratificar ou refutar as conclusões obtidas através do estudo dos gráficos plotados após a simulação e avaliar a coerência do modelo proposto com que se espera observar na realidade.

Observa-se que após 1000 passos, o número de árvores em chamas, em média, está em torno de 82% do número de árvores queimadas. Confirmando que a área da região queimada cresce mais rapidamente que a da região em chamas. Já, para avaliar e comparar o consumo de árvore de cada tipo se deve, previamente, realizar alguns cálculos. No total, tem-se 360.000 pixels, representando árvores ou região sem árvores. Se aproximadamente 70% são árvores do tipo 1, no início, tem-se em torno de 252.000 árvores desse tipo. Ao fim da simulação se observa através do software que restam em média

249.461 árvores do tipo 1, ou seja, um consumo de 1% desse tipo de árvore. Se aproximadamente 25% do total de pixels representam árvores do tipo 2, no início, temos em torno de 90.000 árvores desse tipo. Ao fim da simulação, constata-se que restam em média 89.209 árvores do tipo 2, ou seja, houve um consumo de 0,878% desse tipo de árvore. Esse resultado ratifica o fato que na simulação o número de árvores com temperatura de ignição maior cai mais lentamente do que aquelas de menor temperatura de ignição.

A média dos valores do raio médio da região incendiada está em torno de 38,211 pixels. A partir desse valor se pode estimar a área da região incendiada através da fórmula da área de uma circunferência:

$$A_c = \pi r^2 \quad (39)$$

$$A_c = 3,14 \times (38,211)^2 = 4584 \quad (40)$$

A área da região incendiada é igual ao número de árvores queimadas mais o número de árvores em chamas. Pela Figura 2.1, se pode somar a média dos valores do número de árvores de cada estado, e obtermos o valor dessa área: 4487. Os dois valores obtidos são muito próximos, e se levarmos em consideração o desvio padrão associado a cada parâmetro, pode concluir que o método para definição da fronteira de fogo e do valor do raio médio é eficiente.

Por fim, avaliando a dimensão fractal, percebe-se que se obtém valores muito próximos de dois, resultado da geometria circular do fogo, relativamente regular em condições normais, sem a presença de um vento forte atuando em alguma direção.

2.4. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi cumprido com o desenvolvimento de um modelo e sua implementação como programa de computador para a simulação de incêndios em florestas ou áreas de vegetação densa. Um ponto diferencial dessa proposta é a modelagem a partir das características individuais da menor unidade do autômato: uma árvore ou local sem árvore. Essas características incluem a modelagem gaussiana para a temperatura de uma árvore que entra em combustão e leva em consideração a temperatura mínima de ignição para inflamar a madeira com fogo auto-sustentável. Com um ajuste de escala e parâmetros mais próximos do real, obtivemos largura da fronteira ou faixa de fogo praticamente constante, a menos do início do espalhamento do incêndio, quando ainda não há árvores carbonizadas. Nesse momento todo o calor gerado está concentrado no círculo de fogo sem áreas internas de esfriamento. Logo depois, o número de árvores queimadas passa a crescer mais que o de árvores em chamas e a área atingida pelo fogo é rapidamente ultrapassada pela de árvores carbonizadas, quando o raio da área de árvores carbonizadas atinge duas vezes a largura da faixa de fogo.

Uma constatação importante é o fato de os valores médios da temperatura, na direção radial, apresentarem comportamento semelhante a uma gaussiana, embora os únicos elementos modelados como gaussianas são os históricos das temperaturas individuais de cada árvore no tempo e não um efeito coletivo ao longo da direção de propagação do fogo. Um fato mais previsível foi o percentual em torno de 50% de árvores com maior imunidade a fogo para impedir que esse se propagasse na floresta.

A motivação inicial para esse trabalho tinha a ver com incêndios na floresta amazônica, mas concluímos que esse programa pode ser bem utilizado por florestas plantadas ou plantações agrícolas, como de cana-de-açúcar. Vários outros tipos de parâmetros podem ser estudados com este software, considerados facilmente outros tipos de árvores, não apenas dois como fizemos; colocar vários focos de incêndios em diferentes pontos; estudos de dinâmica de propagação como velocidade e aceleração do fogo em condições diferente de vegetações ou obstáculos. Finalmente, podemos aplicar os recursos desse software a imagens aéreas reais ou obtidas por satélite e fazer testes em que podem ser muito úteis para serviços de combate a incêndios ou controle de queimadas, além de poder acrescentar obstáculos artificiais como os aceiros.

2.5. REFERÊNCIA

BACKES, André Ricardo ; BRUNO, O. M. . **Métodos para a estimativa da dimensão fractal: um estudo comparativo**. Infocomp Journal Of Computer Science, Lavras, MG, v. 4, n. 3, p. 50-58, 2005.

BATISTA, Antonio C. . **Incêndios florestais**. Recife/UFRPE,1990.

BRANDON, P. Comparing Wood Pellets for Heat Output and Burn Time. <<http://www.selah.k12.wa.us/soar/sciproj2006/BrandonR.html#Report>>, acessado em julho de 2007.

BERJAK Stephen G, HEARNE John W. **An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system**. Review Elsevier Ecological Modelling,2002. 133–151

COSTA, Marcos R. Nunes. **Manual para normatização de trabalhos acadêmicos: monografias, dissertação e teses**. Recife: INSAF, 2005.

DROSSEL, Bárbara, SCHWABL, Franz;; CLAR, Siegfried. Crossover from percolation to self-organized criticality. **Physical Review**, October nº4 vol 50, 1994.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Aurélio século XXI: O dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

GOULD, Harvey; TOBOCHNIK, Jan. **An introduction to computer simulation methods: applications to physical systems**. EUA: Addison-Wesley Publishing,1996.

KEANE, Robert E. **A classification of landscape fire succession models: spatial simulations of fire and vegetation dynamics**. Review Elsevier Ecological Modelling 179 (2004) 3–27.

LIBERTY, Jessé. **C++ de A a Z**. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

MATEUS, César Augusto. **C++ Builder 5: guia prático**. São Paulo: Érica, 2000.

OUALLINE, Steve. **Practical C++ Programming**. Printed O'Reilly. 2ª edition, 2002.

PEITGEN, Heinz-Otto; RICHTER, Peter H. **The beauty of fractals: images of complex dynamical systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 199 pág.

REIS, Adriana Neves. **Simulação do crescimento de tumores**. 2001. 43f. Monografia (Bacharelado em Informática) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2001.

SIQUEIRA, Rodrigo. **Introdução aos fractais**. Disponível em www.insite.com.br/fracarte/artigos.php,2006.

WOOLFSON, M.M.; PERT, GeoffreyJ. **Introduction to Computer Simulation**. Oxford University Press (UK), 1999.

CAPÍTULO 3

ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE/PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS PELO MDPA – 1

Os incêndios têm provocado uma série de problemas no planeta Terra, inclusive nos países desenvolvidos. No caso da Europa, sobretudo, na França, Espanha, Portugal, Itália e Grécia que se localizam mais ao sul. No verão, nesses países, aumenta o risco de deflagração de incêndios florestais. Só em 2005, no conjunto desses cinco países queimaram um total de 589.559 hectares e o número de incêndios ultrapassou a média de anos anteriores, contabilizando-se 73.325 sinistros ocorridos nos meses de verão de clima mediterrânico (REGO, 2007).

No Brasil, este fenômeno está mais relacionado à atividade agrícola. No entanto existe certa confusão em distinguir incêndios e queimadas. “Queimadas ou incêndios para desmatamento” são aqueles estabelecidos geralmente de forma intencional e associados ao corte e à queima de floresta para plantio agrícola e/ou formação de pastagens (NEPSTAD, 1999). Ainda, existem os incêndios acidentais e criminosos em que, na maioria das vezes, não há controle e podem ocorrer com a participação do homem ou não. As queimadas ou incêndios para desmatamento são muito comuns no cultivo da cana-de-açúcar, algodão e cereais. Por outro lado, os incêndios florestais, originados do uso inadequado ou descuido no manuseio do fogo, têm provocado inúmeros danos aos recursos florestais e ao ambiente como um todo (BATISTA, 1990).

No caso específico do fogo na Amazônia, sobretudo no Amapá, o que nos chama a atenção são as conseqüências para o globo advindas da exploração sem controle. O fogo é a maior ameaça para a integridade biológica da Amazônia, a mais extensa e rica floresta tropical do planeta. O risco é que essa floresta exuberante seja transformada em fragmentos empobrecidos dominados por plantas invasoras e por vegetação pirogênica, devido os efeitos do aumento de eventos de seca severa e das atividades humanas que, de forma combinada, desgastam a resistência da floresta às chamas (NEPSTAD, 1999). Os incêndios florestais matam quantidades substanciais de biomassa florestal, a qual é decomposta, aumentando, dessa maneira, o fluxo de carbono para atmosfera. Um incêndio de grandeza considerável na Amazônia também aumentaria a emissão de carbono durante os anos subseqüentes, uma vez que as florestas já queimadas tornam-se altamente inflamáveis e passam a sofrer incêndios periódicos (NEPSTAD, 1999).

O fogo na comunidade agrícola tem uma importância significativa. O fogo é tão útil que, representa um componente inseparável da expansão das fronteiras agrícolas. A queimada é utilizada como método mais barato para fertilizar o solo de novas áreas agrícolas. O fogo converte as árvores abatidas no desmatamento em cinzas ricas em nutrientes que são incorporados ao solo. Muito embora, o fogo transformado em incêndio é particularmente difícil de ser resolvido, uma vez que é resultado de uma complexa interação de fatores biofísicos e socioeconômicos presentes nas fronteiras de ocupação (NEPSTAD, 1999).

O Estado do Amapá, foco desta pesquisa, com toda exuberância de ecossistemas não está livre das queimadas indiscriminadas, no ano de 2004 ocorreram 7.810 focos de calor (F.C.) em todo o Estado e em 2005 houve uma distribuição de 2.543 focos, isso representa uma queda de 67,43% do total. O Município de Tartarugalzinho foi quem mais queimou no ano passado, somando 22,49% dos F.C. O Centro-norte novamente é líder nas queimadas, obteve 48,80% dos F.C. O ecossistema mais afetado é o cerrado por representar apenas 6,87% do território amapaense e por está localizado ao longo da BR-156 e onde estão distribuídos a maioria dos focos de calor em áreas não florestadas (GUIMARÃES, 2006; VIDAL, 2006). Este estudo de caso permeia a Reserva Biológica Lago do Piratuba no Estado do Amapá. Embora, no Amapá, tenha ocorrido uma redução nos focos de calor – que em alguns casos originam os incêndios – de 67,43%, a região Centro Norte continua sendo a mais problemática. Nesta linha, a Reserva Biológica do Lago Piratuba é a mais atingida pelas queimadas e incêndios, totalizando 49,21% dos focos de calor das áreas protegidas (GUIMARÃES, 2006; VIDAL, 2006).

3.1. MATERIAL E MÉTODOS

Existe uma diversidade de fatores que influenciam a formação de incêndios. Dentre as principais temos: os raios, os fumantes, queimas para limpeza, fogos de recreação entre outras. Entretanto, o material combustível é essencial para o surgimento e avanço do fogo. Existem alguns tipos de materiais combustíveis, entre eles os mais importantes são: combustíveis de solo (húmus, raízes das árvores, madeira em decomposição, etc.); combustíveis superficiais (cascas, folhas, frutos entre outros); combustíveis aéreos (musgos, líquenes, plantas epífitas, etc.). Estes ainda entram em outras configurações que são: materiais perigosos, semiperigosos e materiais verdes, estes podem ser classificados a partir de sua espessura, quantidade, umidade e compactação (BATISTA, 1990). Também, o posicionamento dos

combustíveis pode influenciar a propagação, por exemplo, em um relevo muito inclinado, o fogo tende a propagar-se com extrema velocidade para o alto, pois, existe uma alimentação contínua de combustível na direção naturalmente procurada pelo fogo, por conta das árvores em uma altura maior. O vento, ou ar em movimento, também ocupa um espaço importante na propagação de incêndios. Esse acelera a secagem dos combustíveis, transporta materiais para outros combustíveis, e, o mais importante, direciona a propagação do fogo. Bem como, a temperatura do mesmo pode determinar a ignição dos combustíveis. Nesse último, o que pode influenciá-lo são os dias mais longos que resultam em mais horas de aquecimento, conseqüentemente temperaturas mais altas (BATISTA, 1990). Na mesma relação, a umidade é uma das mais importantes propriedades que controla a inflamabilidade dos combustíveis vivos e mortos. Normalmente não se tem controle sobre a umidade dos combustíveis, seu nível ou valor será uma conseqüência das condições climáticas.

Tabela 3.1: Conteúdo de umidade do combustível vivo (folhagem).

Estágio de desenvolvimento da vegetação	Conteúdo de umidade (em %)
Brotação nova, com início do ciclo de crescimento	300
Folhagem em manutenção, ainda crescendo com vigor	200
Folhagem madura, completando o novo estágio de crescimento	10
Entrando em dormência, começando amarelar	50
Completamente seca (considerada material combustível morto)	menos 30

Fonte: Andrews citado por BATISTA, 1999.

O nível de umidade em um combustível pode ser aferido por métodos convencionais, extraindo o material combustível *in situ* utilizando e técnicas simples em laboratório, a exemplo a pesagem. Entretanto, Byram, citado em BATISTA (1999), introduz o princípio de “timelag”. Timelag pode ser definido como o intervalo de tempo necessário para a umidade do material combustível perder $(1-1/e)$, ou aproximadamente 63%, do seu valor inicial uniforme de equilíbrio, depois do ambiente ter mudado instantaneamente. A equação básica que descreve este processo é:

$$\frac{\delta m}{\Delta m} = \frac{m - m_i}{m_e - m_i} = 1 - e^{-t/T}$$

Sendo:

δm = variação real de umidade sobre intervalo de tempo t .

Δm = mudança potencial de umidade, isto é, diferença entre os dois valores de equilíbrio.

T = timelag.

m = conteúdo de umidade no tempo t .

m_i = conteúdo de umidade inicial.

m_e = valor do conteúdo de umidade final.

Considerando este princípio, os combustíveis podem ser classificados através do seu timelag ou tempo de resposta, como:

- a) Classe de 1 hora de timelag (1 h – TL), correspondente a combustíveis (caule de árvore) com diâmetro inferior a 0,7;
- b) Classe de 10 horas de timelag (10 h – TL), correspondente a combustíveis (caule de árvore) com diâmetro entre 0,7 e 2,5 cm;
- c) Classe de 100 horas de timelag (100 h – TL), correspondente a combustíveis (caule de árvore) com diâmetro entre 2,5 e 7,6 cm.

No entanto, é importante identificar onde ocorrem incêndios para definir as regiões de maior risco e estabelecer, prioritariamente para essas regiões, programas mais intensivos de prevenção de incêndios. É possível definir detalhadamente os locais de maior incidência de incêndios, através dos registros de ocorrência. Uma forma de identificar os índices de perigo de incêndios em nossa realidade é o uso da Fórmula Monte Alegre. Este índice foi desenvolvido no Brasil, para a região paranaense, porém, tem sido utilizado nas várias regiões do Brasil e testado com frequência. Sua metodologia é baseada na acumulação de dados de uma única variável, a umidade (BATISTA, 1999). Ela é representada pela seguinte equação:

$$FMA = \Sigma \left(\frac{100}{H} \right)$$

Sendo:

FMA = Fórmula Monte Alegre

H = unidade relativa do ar em %

Tabela 3.2: Restrições à somatória da FMA, de acordo com a precipitação do dia.

Chuva do dia (mm)	Modificações no cálculo
>2,4	Nenhuma.
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
<12,9	Interromper o cálculo (FMA=0) e recomenda-se a somatória no dia seguinte.

Fonte: BATISTA, 1999.

O grau de perigo estimado feita pela Fórmula Monte Alegre resulta numa escala, como a apresentada na tabela 3.3:

Tabela 3.3: Escala de perigo da Fórmula Monte Alegre.

Valor de FMA	Grau de perigo
<1,0	Nulo
1,1 a 3,0	Pequeno
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20,0	Alto
>20,0	Muito alto

Fonte: BATISTA, 1999.

Nesta perspectiva, continuamente surgem técnicas de prevenção e combate a incêndios. A prevenção de incêndios florestais se torna um trabalho interminável. A prevenção de incêndios florestais tem por objetivo basicamente impedir a ocorrência de incêndios que tem causa de natureza humana e impedir ou dificultar a propagação daqueles incêndios que não foi possível evitar. Geralmente, a prevenção engloba diversas atividades que devem ser adequadas às causas de incêndios de cada região ou área em particular. Até porque existem várias leis tanto federais como estaduais e municipais que tratam do problema do fogo na floresta. (BATISTA, 1990)

As estratégias de combate ao fogo, basicamente, objetivam confinar os focos de incêndio, para que a partir dessa ação ocorra o controle. Uma técnica muito utilizada é a construção de aceiros. O método consiste em cavar valas ou abrir clareiras entre 2 e 5 metros de largura, paralela a linha do fogo. No caso de grandes incêndios constroem-se aceiros de grandes dimensões para combater ou impedir a expansão do fogo. A construção de aceiros é a mais cara, porém a mais importante técnica disponível para que se evitem incêndios intencionais fora de controle, que possam atingir campos e florestas em propriedades vizinhas (NEPSTAD, 1999). Outros obstáculos à propagação do fogo são barreiras naturais como rios e alagados.

Com o desenvolvimento de ferramentas computacionais de baixo custo que simulam e permitem a realização de testes de incêndios na própria foto aérea ou de satélite o serviço de combate ao fogo em florestas pode ganhar um grande aliado no estudo, estratégia e controle.

3.1.1. Modelagem de aceiros

A importância de um modelo que simula a propagação de incêndios em florestas, como ferramenta que auxilia o homem no estudo da dinâmica do fogo. Esse estudo é relevante ao revelar informações importantes que possam contribuir no controle de incêndios, porém a significância do modelo é elevada consideravelmente se este permitir a simulação de estratégias para o combate de incêndios. Partindo deste princípio, introduziu-se no em nosso simulador, uma ferramenta que permite a introdução de modelos de aceiros, o que conseqüentemente habilita a realização de testes de diferentes configurações, considerando a distribuição e dimensão dos aceiros.

Para a implementação da ferramenta que gera aceiros na floresta modelada, essencialmente, utilizaram-se características gerais dos aceiros reais, ou seja, serem regiões de aspecto linear, sem árvores, de comprimento e largura definida pelo homem, em uma direção apropriada para barrar o avanço do fogo. Logo, permitindo ao usuário do software a introdução de retângulos, de dimensões variáveis, definidas por ele, em qualquer região da floresta, na direção horizontal ou vertical. Apresenta-se, na figura 3.1, o trecho do software em que se pode visualizar a ferramenta de criação de aceiros. O usuário define a largura e o comprimento do aceiro, e clica no botão “Inserir aceiro”, nesse momento o cursor do mouse muda sua forma para uma cruz, e ao clicar em algum ponto do modelo de floresta, é definido o ponto central do aceiro, que é imediatamente inserido. Surge, assim, um retângulo preenchido pela cor oliva, que representa região sem árvores.



Figura 3.1: Parte da interface do software responsável pela inserção de aceiros.

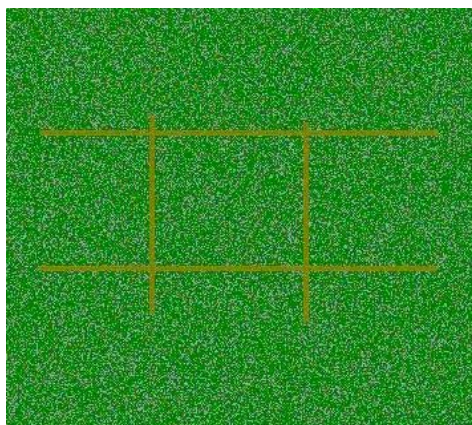


Figura 3.2: Parte da floresta modelada com os aceiros inseridos pelo usuário.

3.1.2. Modelagem da propagação do fogo em florestas utilizando imagens de satélite

Após a implementação dos métodos que estudamos para a simulação da propagação de incêndios em florestas, criamos um modelo que apresentou resultados bastante plausíveis, pois a simulação revelou aspectos que se aproximam do que é observado na realidade. O estudo do modelo proposto pode revelar características relacionadas com a dinâmica do fogo, algumas delas não conhecidas pelo homem e outras de difícil extração quando se trabalha com incêndios reais. Porém, deve-se lembrar que o nosso modelo de fogo age sobre uma floresta modelada, idealizada com características pré-definidas que simulam de forma aproximada da realidade. Este aspecto é importante para a criação do modelo e realização dos testes, pois, além de facilitar o trabalho, permite a realização de variações diversas nas características da floresta modelo. Porém, o grau de aplicabilidade do software se torna reduzido, pois dificilmente a floresta modelada por nós corresponderá, de forma satisfatória, ao que é observado na realidade, além de não abranger às inúmeras configurações de florestas existentes. Para tornar o software mais poderoso como ferramenta de auxílio no estudo da dinâmica do fogo e no controle de incêndios, decidimos utilizar como o ambiente de simulação, não mais florestas modeladas, e sim imagens de satélite de regiões florestais. Como o foco de nossos estudos é a reserva biológica do Lago de Piratuba, utilizamos, como primeiros testes ou estudo de caso, para a implementação das alterações necessárias, imagens de áreas que compõem a reserva. Apresentar-se-á aqui os métodos que utilizamos para a execução dessa etapa do desenvolvimento do software.

Utilizou-se uma imagem de satélite em que se pode visualizar toda a reserva do Lago Piratuba. Porém, considerando que cada pixel da imagem da floresta equivale

a uma região quadrada de vinte e cinco metros quadrados, logo, o simulador, ao percorrer trezentos e sessenta mil pixels, percorre uma região equivalente a uma área de nove quilômetros quadrados, bem inferiores à área abrangida pela reserva. Por isso, considerou-se apenas com um trecho da imagem de satélite. Escolheu-se uma região bem significativa, formada por árvores de mais de um tipo, por lagos e outras formas de relevo sem vegetação que apresenta a região ampliada. Avaliando a figura 3.3 e conhecendo que tipo de vegetação é representado por cada tom de cor, percebemos que podemos distinguir pelo menos a presença de dois tipos de vegetação, a do tipo cerrado (tom alaranjado) e a do tipo equatorial amazônica (tom verde). Observa-se ainda a presença de regiões sem vegetação e um trecho do Lago do Piratuba.

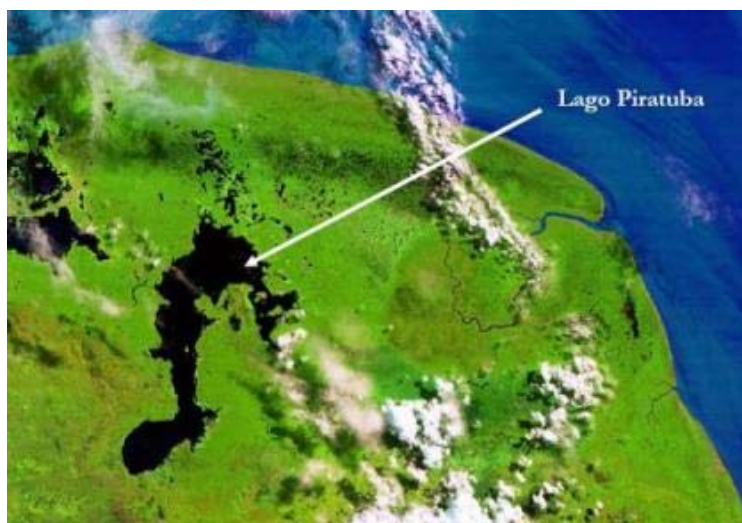


Figura 3.3: Imagem de satélite da reserva do Lago Piratuba.



Figura 3.4: Imagem de satélite percorrida pelo software. Observa-se essencialmente, árvores de dois tipos, cerrado e equatorial, parte do Lago do Piratuba e regiões de relevo sem vegetação.

Apesar das alterações necessárias para a utilização de imagens de satélites serem poucas, o desafio de adaptar os métodos já implementados para trabalharem com uma imagem real é complexo. Após a introdução da imagem de satélite no local da floresta modelada anteriormente, percorreu-se a imagem, reconhecendo os diversos tipos de elementos nela existente, como uma espécie de mapeamento, identificando, sobretudo, o que é ou não é vegetação e os tipos de vegetação existentes, associando parâmetros específicos a cada um. Na imagem utilizada, apresentada na figura 3.6, aparecem dois tipos de árvores, que durante o mapeamento são marcadas e cada uma recebe valores de temperatura de ignição e de tempo de queima apropriados para suas características. Após o mapeamento, a matriz que representa as árvores dos dois tipos e as regiões sem vegetação, estava pronta, com seus respectivos parâmetros, num formato idêntico à matriz base utilizada para a simulação da propagação de fogo na floresta modelada anteriormente. Com isso, a partir deste ponto, os métodos utilizados para a simulação foram os mesmos.

Como esperado, o ponto chave para vencer o desafio de adaptar os métodos antes implementados para trabalharem com uma imagem de satélite, foi qual procedimento se adotaria para distinguir cada pixel da imagem como correspondente a um tipo de árvore ou de região sem árvore. Para a descrição dos métodos utilizados nessa importante etapa, deve-se levar em consideração que, em se tratando de monitores de vídeos, a imagem é formada por emissão de radiação luminosa, em um processo envolvendo combinação das três cores primárias: vermelho, verde e azul,

formando assim chamado de sistema RGB de cores (GONZALES, 2000), em que “R” equivale ao vermelho (red), “G” ao verde (green) e “B” ao azul (blue). Neste sistema, uma cor é um vetor no espaço tridimensional que pode ser representada por suas coordenadas (r, g, b). Partindo desse conhecimento, utilizamos como critério para distinção dos tipos de vegetação, os valores das componentes associados a cada tipo de vegetação. Para isso, selecionou-se dois trechos da imagem, caracterizados cada um, por um predomínio, quase que completo de apenas um tipo de árvore. Percorreu-se cada trecho, capturando as componentes de cores de cada pixel e, ao fim do processo, calcula-se a média e o desvio padrão dos valores de cada componente para cada tipo de árvores. Com esses dados, foi estabelecido um critério bem definido para a distinção das árvores. Essencialmente, vegetação do tipo cerrado apresenta alto valor para a componente vermelha, enquanto a vegetação do tipo equatorial amazônica apresenta alto valor para a componente verde.

Para a atribuição dos valores dos parâmetros temperatura de ignição e tempo de queima para cada árvore, considerou-se, fundamentalmente, que as árvores do tipo equatorial amazônica deveriam possuir uma temperatura de ignição mais alta do que as do tipo cerrado, já que são mais úmidas, e um tempo de queima também maior, pois possuem maior porte. Para todas as simulações que utilizam imagens de satélite utilizou-se o valor da temperatura de ignição das árvores do tipo equatorial amazônica igual a 400 °C e seu tempo de queima variando de 120 a 240 (60 a 120 min.). Já para as árvores do tipo cerrado, foi utilizado o valor da temperatura de ignição igual a 250 °C e seu tempo de queima variando de 60 a 120 (30 a 60 min.).

Na figura 3.7, pode-se visualizar uma comparação entre a imagem de satélite original e a mapeada, onde se atribuiu, por questões didáticas, a cor amarela para a vegetação do tipo cerrado, a cor verde para a vegetação do tipo equatorial amazônica e a cor preta pra qualquer ponto que não represente vegetação. A comparação é importante para avaliar a coerência do processo.

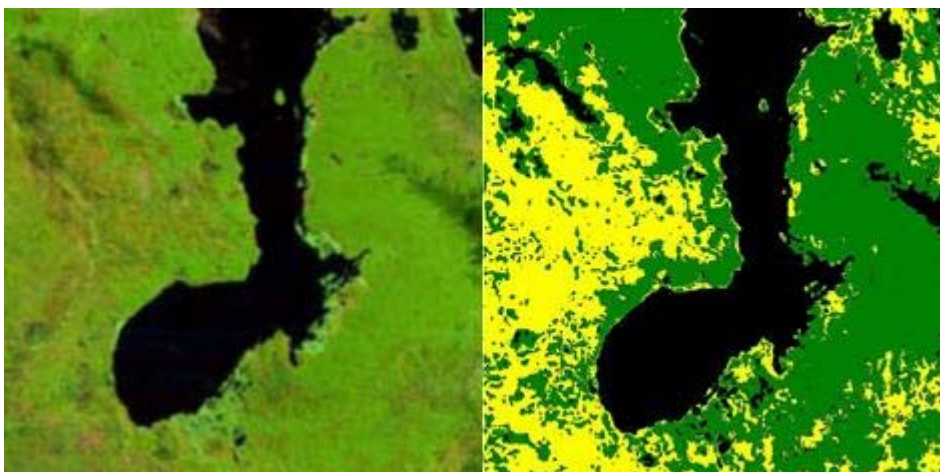


Figura 3.5: Imagens de satélite original (à esquerda) e a mapeada (à direita). A cor amarela define a vegetação do tipo cerrado, a cor verde a vegetação do tipo equatorial amazônica e a cor preta qualquer ponto da floresta que não represente vegetação.

3.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2.1. Efeito dos aceiros na simulação

Resultados esperados foram obtidos através da introdução de uma ferramenta para a inserção de figuras geométricas que simulam aceiros na floresta modelada. Essencialmente, observa-se que o fogo não se propaga pela região dos aceiros, que funcionam como verdadeiras barreiras. Esse tende a contorna tais regiões, conservando sua geometria circular após atingir a área posterior aos aceiros.



Figura 3.6: Comportamento do fogo diante da presença de um aceiro, representado por uma linha de cor oliva. Vemos que o fogo contorna o aceiro, e mantém sua geometria circular.

3.2.2. Simulação da propagação do fogo utilizando imagens de satélite

O desenvolvimento do software que simula a propagação de fogo em florestas representadas pela sua imagem capturadas por satélite pode ser considerado o principal resultado. Porém, algumas análises interessantes podem ser realizadas, que além de revelar um plausível grau de aderência à realidade do modelo proposto, contribuem para um melhor entendimento da dinâmica do fogo em uma floresta com uma distribuição mais realista de tipos de árvores. A figura 3.7, se observa a propagação do fogo em duas regiões diferentes da floresta, a mais à esquerda, é caracterizadas por uma vegetação formada quase que totalmente por árvores do tipo cerrado, já a mais à direita, por árvores do tipo equatorial amazônica. Os dois focos de incêndio começaram ao mesmo tempo.

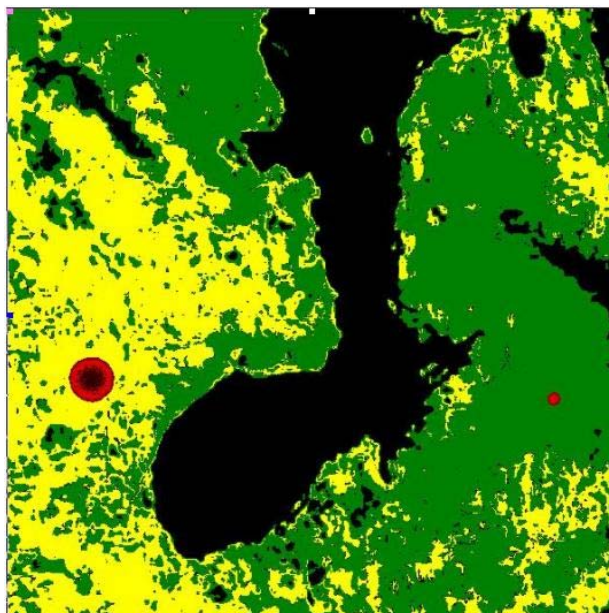


Figura 3.7: Propagação do fogo em regiões de tipo de vegetação diferentes: à esquerda temos uma região de cerrado, à direita temos uma região de floresta equatorial amazônica.

Observa-se na figura 3.7 que na região de cerrado o fogo consumiu uma área bem maior do que o fogo presente na região de floresta equatorial amazônica, além disso, no primeiro se observa uma região central bastante relevante, formada por árvores já queimadas, ou seja, cujo fogo se extinguiu. No outro foco, o número de árvores já queimadas é bem reduzido em relação ao número de árvores ainda em chamas. Esta diferença é consequência da diferença no tempo de queima entre as

árvores de cada tipo, ou seja, como a vegetação de cerrado queima mais rápido, há uma proporção maior de árvores queimadas para árvores em chamas.

Na figura 3.8 em que podemos ver, em diferentes estágios, a imagem de um incêndio em uma região de transição entre a vegetação do tipo cerrado e a do tipo amazônica. O fogo é iniciado em uma região de vegetação do tipo equatorial amazônica, expande de forma circular, porém quando atinge a região dos cerrados, há uma sensível alteração na geometria circular do fogo, pois este se propaga de forma mais intensa na direção dessa vegetação, havendo uma distorção na simetria observada quando trabalhamos com regiões homogêneas. Agora, a região de árvores queimadas não se concentra apenas no centro como normalmente ocorre em outras simulações.

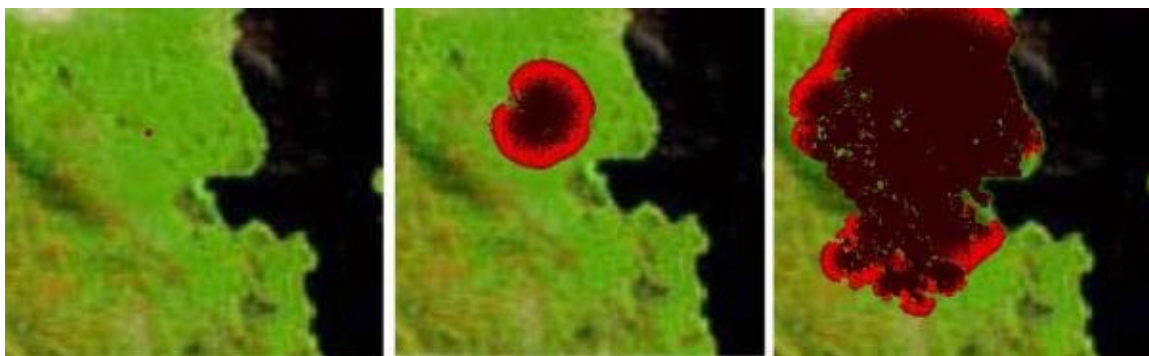


Figura 3.8: Diferentes estágios da evolução do fogo em uma região de transição entre florestas de dois tipos diferentes.

Na figura 3.9, observa-se a REBIO funcionando como uma verdadeira barreira natural impedindo que o fogo avance para o outro lado da floresta. Ocorre uma distorção na forma da região incendiada, pelo fato de haver vegetação dos dois tipos.

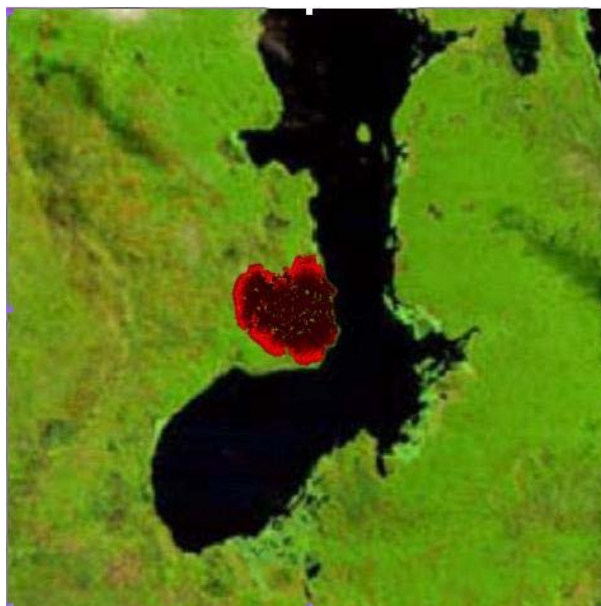


Figura 3.9: A REBIO funcionando como uma verdadeira barreira natural.

3.2.3. Aceiros em simulação com imagens de satélite

Um ponto importante neste estudo é a realização de testes de diferentes configurações de aceiros através da utilização do simulador que trabalha com imagens de satélite. Essa etapa do trabalho se destaca pelo fato de utilizarmos, de forma direta, o software como ferramenta de auxílio ao combate de incêndio, pois através da introdução de aceiros em pontos estratégicos da imagem da floresta, pode-se visualizar o comportamento do fogo diante desse método de controle de incêndios.

No primeiro caso, ilustrado pela figura 3.10, em que se tem um foco de incêndio próximo ao Lago Piratuba, iniciado em um mesmo ponto e transcorrido o mesmo número de passos. A introdução de um aceiro de comprimento equivalente a 500 metros de extensão, combate fortemente o avanço do incêndio pela floresta, notadamente, inibe a propagação do fogo pela região de cerrado próximo ao lago.

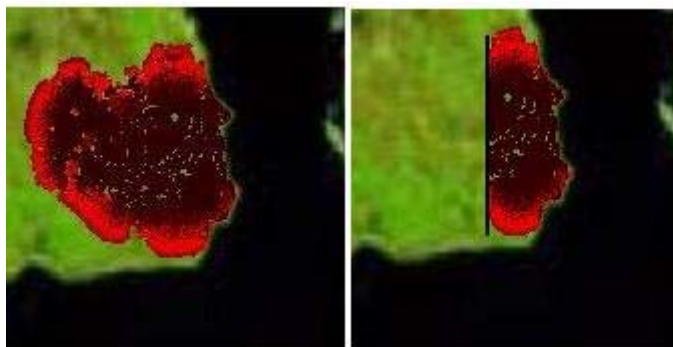


Figura 3.10: Imagem de propagação do fogo em duas simulações diferente. Ambas apresentam a mesma configuração para todos os, parâmetros, porém na segunda, à direita, introduzimos um aceiro.

Considere-se a seguinte situação: uma região formada por árvores equatoriais amazônicas, próxima a uma região de cerrado. Partido do ponto de vista que árvores desse último tipo pegam fogo mais facilmente, o ideal retardar ao máximo que um foco de incêndio gerado nessa região atinja a floresta do tipo amazônica. A introdução de um aceiro em um local estratégico pode ser um excelente método de retardo. Para simular tal situação, decidi-se acompanhar o tempo, em passo de máquina, que o fogo demora para atingir a região considerada importante, com e sem aceiro. Na figura 3.11, a região a ser protegida é indicada pelo número 1, e a região em que pode surgir o foco de incêndio, indicada por 2. Analisando bem a configuração da região, percebe-se que podemos proteger a região de floresta equatorial amazônica, de forma significativa, se utilizarmos um aceiro de extensão equivalente a 500 metros, ligando o lago do Piratuba a uma região de mangue, que a floresta simulada é uma região imune a fogo devido à alta umidade. O aceiro pode ser visualizado através da figura 3.12. Adota-se essa estratégia, pois se aproveita barreiras naturais, gerando a necessidade da introdução de aceiros de menor extensão e com maior eficácia. Na simulação da propagação do fogo partindo de um ponto do cerrado, sem a presença de aceiros, foram necessários 1043 passos de máquina para a região a ser protegida ser atingida pelo fogo. Já na simulação da propagação do fogo a partir do mesmo ponto do cerrado, porém considerando-se o aceiro, foram necessários 3226 passos para que a região protegida fosse atingida.



Figura 3.11. Imagem da região de floresta equatorial amazônica (1) que desejamos proteger dos incêndios originados no cerrado (2).

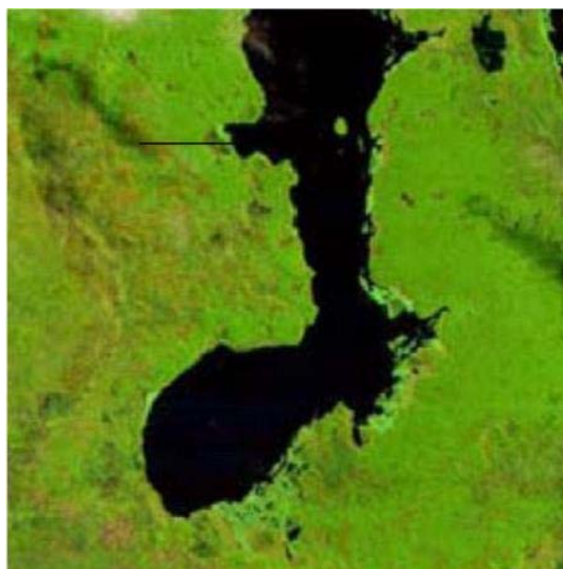


Figura 3.12: Imagem de aceiro que inserido para proteger o trecho da floresta equatorial amazônica considerado importante. Notemos que o aceiro liga duas regiões caracterizadas por serem barreiras naturais ao fogo.

Na figura 3.13, a simulação de um incêndio iniciado na região de cerrado e que foi finalizada no momento em que atingiu a região da floresta equatorial amazônica que deve ser protegida. Já na figura 3.14, tem-se a simulação do fogo partindo do mesmo ponto do cerrado da anterior, porém há um aceiro protegendo a região considerada mais importante.



Figura 3.13: Simulação de um incêndio iniciado na região de cerrado, sem a presença do aceiro.

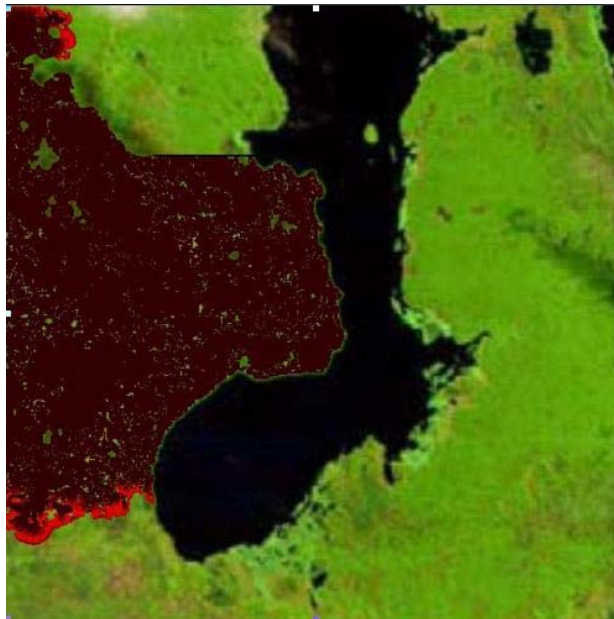


Figura 3.14: Simulação de um incêndio iniciado na região de cerrado, com a presença do aceiro impedindo que o fogo progrida com facilidade para cima nas proximidades do lago.

3.3. CONCLUSÃO

A adaptação do software para simulação com fotos reais de satélite abre possibilidades importantes e ainda inexploradas de realizar os verdadeiros testes de incêndios sem queimar uma única árvore. A quantidade de testes que pode ser feita também é praticamente ilimitada. Melhorando a calibração entre as escalas dos gráficos e a vegetação real, podemos obter respostas mais plausíveis para um determinado tipo de floresta. Dessa forma podemos consultar este sistema de simulação para saber em quanto tempo os o serviço de combate a incêndios teria que agir para que o fogo não atingisse uma determinada área especialmente delicada, por sua fauna e flora, da reserva, por exemplo. Também podemos obter projeções como qual a quantidade de água ou outro recurso de brigada de incêndio para apagar o fogo que começou em um determinado ponto.

É importante frisar também que não encontramos, na literatura científica, nenhum modelo ou ferramenta de simulação de incêndios que realizasse os testes diretamente em fotos digitalizadas de satélite.

3.4. REFERÊNCIAS

BATISTA, Antonio C. . **Incêndios florestais**. Recife/UFRPE, 1990.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E.. **Processamento de imagens digitais**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2000.

GUIMARÃES, Salatiel; VIDAL, Maria C. B..Relatório de focos de calor do Estado do Amapá em 2005.Macapá:SEMA, 2006.

REGO, Bruno. **A Europa e os incêndios florestais**.Lisboa: Café Babel,2007.

simulations of fire and vegetation dynamics. Review Elsevier Ecological Modelling 179 (2004) 3–27

4. CONCLUSÃO GERAL

O principal objetivo deste trabalho foi elaborar um software, e realizar um primeiro estudo de caso, de simulação de incêndios na REBIO do Lago Piratuba – AP. Realizou-se esse objetivo em três etapas: primeiro, criou-se um modelo lógico e matemático baseado na dinâmica de reações e na termodinâmica da combustão de uma árvore; segundo, implementou-se um programa computacional em linguagem utilizada pelos profissionais da área de computação para torná-lo mais acessível ou portátil; terceiro, realizou-se um teste com imagens reais de satélite obtidas da REBIO do Lago Piratuba.

O modelo tem a particularidade de basear toda a simulação no comportamento individual aproximado da termodinâmica das reações envolvidas na queima de uma árvore e nas condições coletivas das vizinhanças que levam uma árvore a pegar fogo. O modelo funcionou na forma de um autômato celular sofisticado em que a contaminação de um sítio (com ou sem árvore) por fogo dependia da temperatura dos vizinhos, das propriedades da própria árvore ou do sítio e de variáveis não controladas ou desconhecidas, levadas em conta como fatores aleatórios por métodos do tipo Monte Carlo. Quando o modelo foi implementado, em C++ Builder (compilador Borland), obteve-se imagens de incêndios simulados em florestas virtuais, com mais de um tipo de árvore, que demonstravam certo realismo ou grande semelhança com o que é observado em imagens reais, só faltou a fumaça para completar a sensação visual de uma vista aérea de um incêndio real.

Constataram-se alguns pontos interessantes como: a faixa de chamas ao longo da direção radial, a partir do centro do círculo de fogo, tem uma distribuição de temperatura em formato similar a uma curva Gaussiana, mesmo que não tenhamos programado esse efeito, pura consequência da dinâmica coletiva de combustão das árvores; outro ponto observado foi a área de árvores em chamas ser inicialmente maior que a de árvores queimadas, mas essa situação se inverte em pouco tempo quando o crescimento no número de árvores em chamas passa a variar linearmente com o raio ou o tempo, enquanto o de árvores queimadas passam a crescer aceleradamente como uma potência proporcional ao quadrado do raio ou do tempo. O software desenvolvido permite a obtenção dos valores médios de vários parâmetros, entre eles, a dimensão fractal da fronteira de fogo, por se assemelhar às formas não euclidianas regulares, que pode servir como caracterização geométrica na comparação precisa entre a imagem simulada e a real. Também é calculado o número

médio de árvores, para várias simulações, de cada tipo que foi “plantado” na floresta, o de árvores que estão queimando e o daquelas que foram queimadas. Através desses números médios e parâmetros de tempo (passo de máquina com conversão para unidades de tempo do incêndio real) podem ser estudados fatores importantes como velocidade de propagação sob várias condições como vento em qualquer direção no plano Norte-Sul, na presença de obstáculos e, através de ajustes de áreas com dados experimentais previamente conhecidos, a estimativa da quantidade de água necessária para evitar o alastramento do fogo.

A parte mais impressionante da aplicação do software são as simulações realizadas com imagens reais da REBIO. Procurou-se demonstrar as possibilidades de uso de software como a construção de obstáculos artificiais do tipo aceiros para impedir ou dificultar a propagação do fogo. O fato de a reserva possuir grandes e pequenos lagos, ajudar a barrar o fogo em algumas direções. No entanto, o encurralamento do fogo por lagos e rios também pode ser a expulsão da fauna local para abismos, como a água, que pode representar a morte de muitas espécies. Assim como, um incêndio que começa numa área de floresta amazônica densa, se espalha com muita rapidez e forma irregular mais irregular em áreas de vegetação de cerrado.

Portanto, os testes de incêndios utilizando várias estratégias para avaliação de riscos e compensações, como a utilização de aceiros ou de água emergencial para apagar o fogo, tornam-se de suma importância quando realizados sobre a própria fotografia da floresta, levando-se em conta as diferenças no tipo de vegetação.

Até o momento não encontramos resultados similares, na literatura científica que estudamos, em que os testes de incêndios são realizados sobre imagens reais digitalizadas obtidas com satélite.