

# MODELO DE PROPAGAÇÃO DE FOGO EM INCÊNDIOS FLORESTAIS E A TEORIA DE PERCOLAÇÃO

**Rodolfo M. Almeida**

Curso de Pós-graduação em Computação Aplicada - INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

E-mail: rodolfo@lac.inpe.br

**Elbert E. N. Macau, Fernando M. Ramos**

Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

E-mail: elbert@lac.inpe.br, fernando@lac.inpe.br

**Helena França**

Divisão de Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

E-mail: helena@dge.inpe.br

## Resumo

Neste artigo simulamos a propagação do fogo em incêndios florestais utilizando um modelo probabilístico e espacialmente explícito. Aplicamos conceitos da teoria de percolação para representar os fenômenos de ignição e propagação. O fogo se propaga de uma célula em chamas para qualquer uma das oito células vizinhas como um evento estocástico independente com probabilidade  $I$ , onde  $I$  pode variar de 0 a 1. Uma célula com material combustível permanece em seu estado caso nela não ocorra a ignição. Uma vez levada à ignição, seu estado será, nas duas iterações seguintes, *queimando* e *queimado*. A extinção do incêndio ocorre se novas células não forem levadas à ignição em uma dada iteração. Dois regimes bem definidos são caracterizados no modelo, a propagação e a extinção, os quais são separados por uma transição brusca - a transição de percolação. Baixos valores para  $I$  produzem padrões de queima “dendríticos”, onde a propagação flui de forma suave e lenta e o fogo logo se extingue, enquanto que altos valores produzem padrões sólidos onde a propagação flui sem cessar. Efeitos do acúmulo de combustível e do vento são incluídos no modelo. Em áreas com menor acúmulo de biomassa, onde há uma maior dificuldade do fogo se propagar, atribuímos um valor baixo de  $I$ . Altos valores de  $I$  caracterizam a propagação do fogo em regiões com grande acúmulo de combustível. Os efeitos do vento são introduzidos com um incremento na probabilidade de propagação para vizinhos adjacentes situados na direção do vento. Executamos simulações do modelo visando prever padrões apresentados por dois incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas, estado de Goiás, Brasil.

## 1 Introdução

Observado em três escalas de medida de espaço e tempo, o fogo apresenta distintas características [16]. Os fatores dominantes em cada escala são mostrados na Figura 1. Em pequena escala temos a chama, a manifestação visível do processo de combustão, resultante da interação entre um combustível e o oxigênio, na presença de uma fonte de ignição. Numa escala intermediária temos o incêndio florestal, cujo comportamento resulta da combinação de três conjuntos de fatores: combustível, condições atmosféricas e topografia. No incêndio florestal o fogo consome a vegetação e as chamas liberam uma grande quantidade de calor. Parte desse calor é transferido para a vegetação que ainda não queimou conduzindo-a à ignição. Na escala regional, os efeitos do fogo têm como consequência principal a alteração na distribuição e dominância de diferentes tipos de vegetação. O regime de incêndios que ocorre em uma dada região favorece a permanência de espécies vegetais melhores adaptadas ao fogo.

Este trabalho envolve a modelagem do comportamento do fogo na escala intermediária - o *incêndio florestal*. Nesse nível de abstração destacam-se os *modelos de propagação do fogo*, que simulam o avanço do fogo sobre a superfície por um conjunto de regras ou equações que levam em conta variáveis relacionadas com a vegetação, topografia e condições atmosféricas [15]. Seguindo as definições propostas em [15], de acordo com a abordagem considerada, os modelos de propagação do fogo podem ser classificados como:

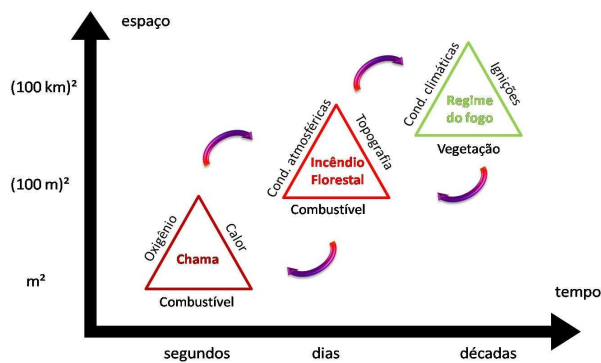


Figura 1: Fatores dominantes que influenciam o fogo em diferentes escalas de medida do tempo e do espaço.

- *modelos teóricos*: originados geralmente das leis que governam a mecânica dos fluidos, combustão e transferência de calor. A validação desses tipos de modelos é extremamente difícil, embora possam ser extrapolados para uma grande variedade de situações de incêndios.
- *Modelos semi-físicos*: propostos por expressões teóricas simples e gerais que são complementadas através de experimentos. Sua extrapolação é adequada em situações similares àquelas usadas na obtenção dos dados experimentais.
- *Modelos empíricos*: obtidos empiricamente com base em informações extraídas de dados experimentais ou de incêndios históricos. São aplicados somente a situações onde as condições são idênticas àquelas usadas nos dados de formulação e teste do modelo.

Dentre os modelos empíricos, vamos aqui nos ater àqueles que utilizam técnicas de *percolação* e *autômatos celulares*. Modelos baseados em autômatos celulares - também chamados *modelos espacialmente explícitos* [2] - descrevem a paisagem em subunidades de área, chamadas *células*. Cada célula possui uma localização, uma vizinhança e a ela são incorporados atributos correspondentes às características ambientais. Cada célula possui um conjunto finito de estados e um conjunto de regras determinam a transição entre eles, levando em conta o estado da própria célula, das células vizinhas e fatores ambientais [13, 12, 1]. Na simulação da propagação de incêndios florestais por *percolação*, o fogo se propaga de uma célula para suas vizinhas de acordo com uma pro-

babilidade específica, que depende de condições ambientais. Esta probabilidade é ajustada a dados de experimentos ou de históricos de incêndios [6, 14].

Modelos de percolação têm sido amplamente utilizados para representar o comportamento do fogo [6, 7, 10]. Este trabalho visa aplicar os conceitos de teoria de percolação na simulação de cenários de propagação do fogo em paisagens naturais, com o objetivo de obter as proporções atingidas por um incêndio em função de determinadas condições ambientais. Tais resultados se configuram como uma informação muito importante para órgãos responsáveis pelo manejo do fogo em unidades de conservação. A região-alvo de nossos estudos é o Parque Nacional das Emas, situado no estado de Goiás - Brasil.

Nosso artigo é dividido em quatro partes. Na primeira, discutimos a respeito do comportamento do fogo em incêndios no Parque Nacional das Emas e sobre os dados ambientais utilizados nesse trabalho. Na segunda parte, apresentamos os conceitos envolvidos na aplicação de teoria da percolação na modelagem do comportamento do fogo e descrevemos o modelo de propagação do fogo que estamos aplicando na região-alvo. Na terceira parte experimentos de simulações são realizados visando prever o cenário de propagação de alguns incêndios históricos. Finalmente, efetuamos as conclusões e direcionamentos futuros.

## 2 O fogo no Parque Nacional das Emas

Criado em 1961, o Parque Nacional das Emas (PNE) possui uma área de um pouco mais que 131.000 hectares e está localizado no extremo sudoeste do estado de Goiás, próximo às divisas com o Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, entre as latitudes 17°51' e 18°21' S e longitudes 52°43' e 53°07' W, conforme mostra a Figura 2.

O PNE apresenta uma posição de destaque entre as Unidades de Conservação de Cerrado em relação ao mapeamento histórico de incêndios. Por meio de interpretação visual de imagens de satélite, os primeiros registros sistemáticos foram apresentados por [8], e abrangem o período de 1973 a 1995. O período de 1995 a 2000 encontra-se registrado em [17]. A referência [9] engloba estes dois trabalhos e inclui registros do período entre 1995 e 2003. Essas informações, combinadas com dados

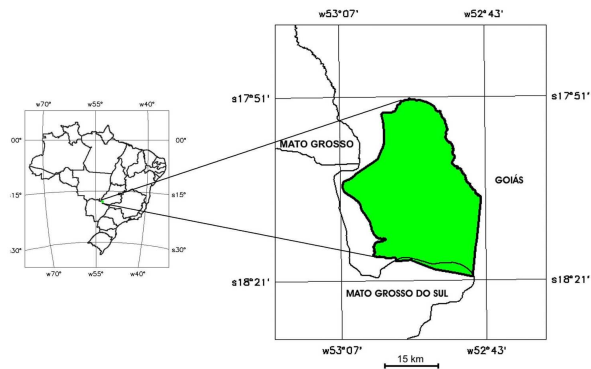


Figura 2: Localização do Parque Nacional das Emas.

de cobertura vegetal e históricos de condições meteorológicas, permitem a caracterização do ambiente em que os incêndios ocorreram, fornecendo subsídios para o estudo do comportamento do fogo no Parque.

O comportamento do fogo em incêndios florestais resulta do efeito conjunto de fatores como vegetação, condições climáticas e topografia [16]. A estrutura da vegetação do Parque - quando enquadrada na descrição de tipos fisionômicos gerais como formações florestais, savânicas e campestre - indica a predominância de fisionomias abertas (savânicas e campestre) [17], caracterizando assim um ambiente para a ocorrência de incêndios de superfície, onde predominam a queima com chamas da vegetação seca acumulada sobre a superfície. Como grande parte do Parque está situada no topo de uma chapada, onde altitudes variam entre 800 m e 890 m [17], a topografia influencia pouco no comportamento do fogo. Dentre os demais fatores destacam-se como mais importantes a velocidade e direção do vento, e a distribuição de combustível (acúmulo e continuidade) sobre a superfície.

A continuidade do combustível pode ser interrompida por causas naturais, como a presença de rios, ou por causas artificiais, como os aceiros<sup>1</sup> e estradas do interior do Parque, que atuam como barreiras ao avanço do fogo. As Figuras 3(a) 3(b) mostram, respectivamente, os padrões finais dos incêndios ocorridos nos períodos de Junho de 2001 a Maio de 2002 e de Junho de 2002 a Maio de 2003.

<sup>1</sup>O aceiro é uma técnica para prevenção de incêndios onde regiões de discontinuidades são estabelecidas na vegetação visando evitar a propagação do fogo. A malha de aceiros do PNE inclui também as estradas no seu interior e totaliza 348 km, dividindo o parque em 20 blocos. Manutenções periódicas devem ser executadas visando manter a discontinuidade de combustível acumulado na superfície.

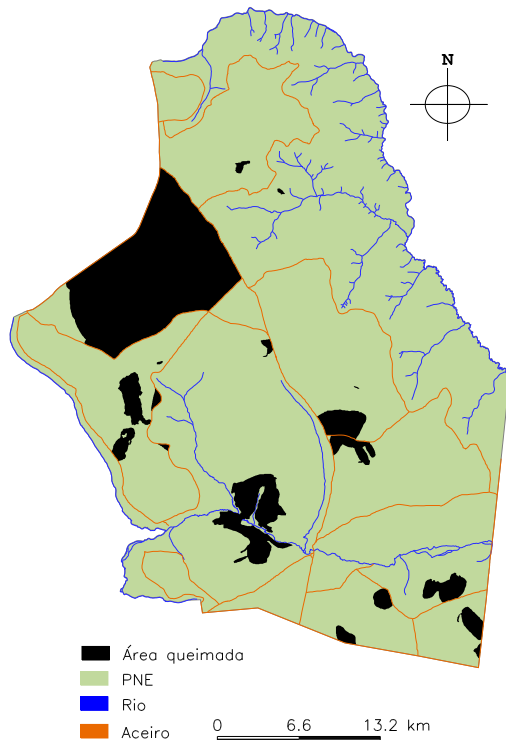
Percebe-se nas imagens que os aceiros (linhas marrons) e rios (linhas azuis) atuam como barreiras na propagação dos incêndios (áreas pretas), contendo-os ou induzindo-os a contornar os obstáculos encontrados. A seta vermelha na Figura 3(b) indica um incêndio que ultrapassou o aceiro devido à falha na manutenção dos mesmos.

O recente regime de incêndios ocorridos no PNE, com predominância de incêndios naturais iniciados por raios e quase total ausência de incêndios antrópicos, criou um verdadeiro mosaico na cobertura vegetal do Parque [9]. Com a ausência dos grandes incêndios que deixavam quase a totalidade do Parque homogênea quanto ao estado de desenvolvimento da vegetação e biomassa seca acumulada, os incêndios naturais de tamanhos, datas e localizações variadas deram origem a áreas com diferentes densidades de biomassa e fases fenológicas. Áreas recém queimadas não atingem densidade de biomassa suficiente para propagação do fogo, agindo como barreiras para incêndios vizinhos. A seta vermelha na Figura 3(b) indica um incêndio ocorrido em novembro de 2002 que contornou uma área queimada em março de 2002 (ver Figura 3(a)).

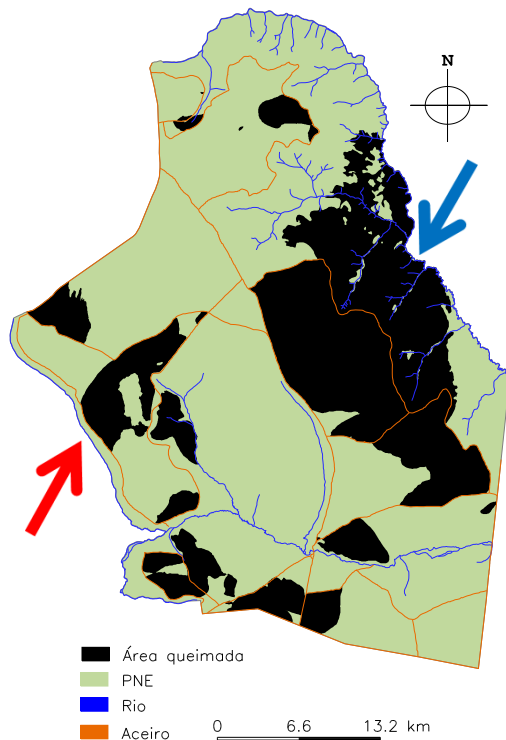
O mosaico da vegetação pode ser mapeado em função do número de anos sem queima e essa informação é muito importante para prever o risco e padrões de queimadas futuras. Assim, áreas que não foram atingidas pelo fogo há mais tempo acumulam maior quantidade de biomassa combustível, tornando-se portanto, mais suscetíveis ao fogo. Inversamente, as regiões mais recentemente atingidas pelo fogo têm menor risco de queimar novamente.

### 3 Descrição do modelo de propagação

O modelo aqui proposto trata a paisagem como um reticulado bidimensional de células quadradas com dimensões 30 metros x 30 metros (900 metros quadrados de área). O atributo ambiental de cada célula corresponde ao tipo de cobertura, podendo ser célula combustível (vegetação) ou célula não-combustível (aceiro e rio). Células com material não-combustível não sofrem transição de estado. Uma célula com material combustível mudará seu estado caso seja levada à ignição. Consideramos que uma célula queima em um simples passo de tempo. Uma vez ocorrendo a ignição, o estado da célula combustível nas duas



(a) Junho de 2001 a Maio de 2002



(b) Junho de 2002 a Maio de 2003

Figura 3: Incêndios identificados para os períodos (a) Junho de 2001 a Maio de 2002 e (b) Junho de 2002 e Maio de 2003. Em (b) a seta azul indica um incêndio que ultrapassou os aceiros e a seta vermelha indica um incêndio que não queimou uma área com pouco acúmulo de combustível, a qual foi originalmente queimada em (a).

iterações seguintes serão, na respectiva seqüência, *queimando* e *queimado*. A Figura 4 ilustra as transições de estados assumidos em função das características ambientais da célula.

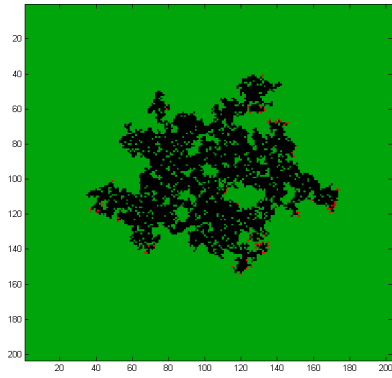


Figura 4: Transições de estado das células em função do atributo ambiental. Uma célula não-combustível, que pode ser aceiro ou rio, sempre permanece em seu estado. Uma célula combustível permanece em seu estado caso ela não seja levada à ignição. Uma vez ocorrendo a ignição no passo de tempo  $i$ , o estado da célula combustível no passo de tempo  $i + 1$  será *queimando* (cor vermelha) e depois em  $i + 2$  será *queimado* (cor preta).

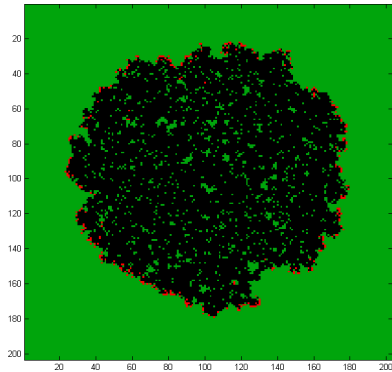
O conceito de *percolação de ligação simples* é aqui utilizado para representar o fenômeno de ignição e propagação. O fogo propaga de uma célula que está *queimando* para uma célula combustível vizinha se uma ligação entre elas estiver presente. A ligação ocorre como um evento estocástico independente, com probabilidade  $I$ , onde  $I$  pode variar entre 0 e 1. A vizinhança de cada célula compreende as oito células no seu entorno e a cada iteração as possíveis ligações são efetivadas ou não segundo a probabilidade  $I$ . A propagação do fogo se extingue em uma dada iteração se novas células não forem levadas à ignição em um dada iteração.

No final da simulação tem-se uma rede representada por células interconectadas. Se  $I$  é pequena, então esperamos apenas regiões conexas de extensões reduzidas. Acima de uma probabilidade crítica  $I_c$ , a rede percola, ou seja, existe um agrupamento extenso de células interligadas que conecta bordas opostas da rede [18]. No modelo, baixos valores para a probabilidade de propagação  $I$  produzem padrões de queima “dendríticos”, onde a propagação flui de forma suave e lenta e o fogo aos poucos se extingue, enquanto altos valores de probabilidade produzem padrões sólidos, similares a incêndios que se propagam rapidamente. Esses efeitos podem ser vistos na Figura 5.

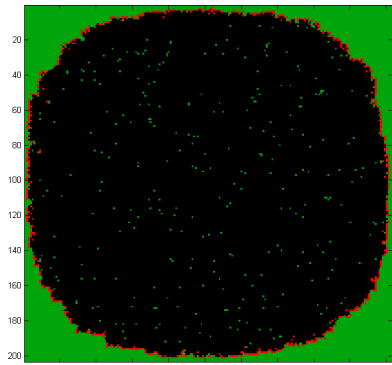
Em função de variações no valor de  $I$ , mudanças no regime de propagação ocorrem de maneira não linear, onde existem dois regimes bem definidos: a *propagação* e a *extinção*, separados por uma



(a)  $I = 0,25$



(b)  $I = 0,30$

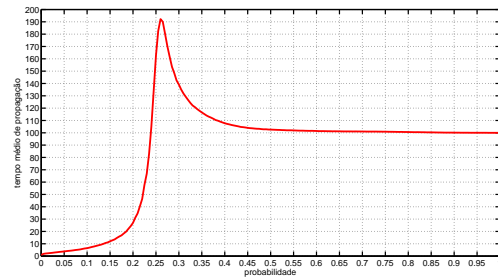


(c)  $I = 0,45$

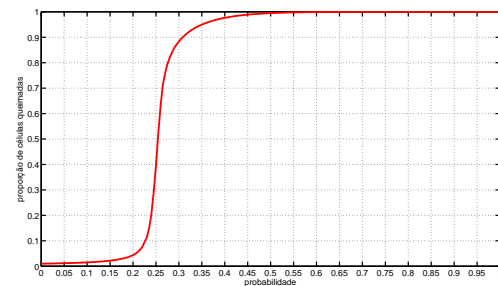
Figura 5: Padrões produzidos após 100 passos de tempo para diferentes valores de  $I$  em uma paisagem homogênea definida sobre uma grade de  $200 \times 200$  células. Células na cor verde representam a vegetação, células na cor vermelha estão queimando em  $t = 100$  e a células pretas queimaram antes de  $t = 100$ . Como condição inicial a célula no centro da grade é levada à ignição em  $t = 0$ . Em (a) temos o padrão de queima dendrítico ( $I = 0,25$ ). Percebemos em (b)  $I = 0,30$  e (c)  $I = 0,45$  que aumentos no valor de  $I$  produzem padrões mais sólidos.

transição brusca - a *transição de percolação*. O gráfico mostrado na Figura 6 caracteriza este comportamento. Para cada valor de  $I$  um total de 500

simulações foram executadas utilizando uma grade de  $100 \times 100$  células e com o fogo iniciando em toda a borda esquerda da grade. Os valores médios do tempo de propagação e da proporção de células queimadas foram calculados. Observando a Figura 6(a), percebe-se que o tempo médio de propagação aumenta até se atingir a probabilidade crítica  $I_c$ , chamada de *limiar de percolação*. A partir desse limiar o fogo percola livremente pela superfície, com o tempo de propagação se reduzindo até o valor limite de 100 iterações (uma dimensão da grade) para  $I = 1$ . A Figura 6(b) mostra que a área atingida pelo incêndio aumenta com o aumento de  $I$ , ou seja, o fogo se propaga com maior facilidade e os padrões são mais sólidos para maiores valores da probabilidade de propagação, conforme pode ser observado nos padrões mostrados na Figura 5. Com base nesta análise, consideramos o valor do limiar de percolação de  $I_c = 0,25$ .



(a)



(b)

Figura 6: Caracterização da transição de percolação no modelo. Em (a) temos o tempo médio de propagação e em (b) a proporção média de células queimadas. Nas simulações utilizou-se uma grade de  $100 \times 100$  células com a propagação do fogo se iniciando em toda a borda esquerda da grade. Para cada um dos 200 valores de  $I$  utilizados foram executadas 500 simulações. As médias do tempo de propagação e da proporção de células queimadas foram calculadas para cada conjunto de 500 simulações.

### 3.1 Representando classes de acúmulo de combustível

Os dados utilizados nas simulações são extraídos de um banco de dados geográficos que opera sobre a plataforma SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas) [3]. O banco contém os incêndios mapeados para o Parque divididos em grupos anuais, que vão desde 1973 a 2007, além do mapas da rede de aceiros, da rede de drenagem e de classificação da vegetação do Parque.

Como vimos anteriormente, o acúmulo e a continuidade de combustível são os fatores que influenciam o comportamento do fogo no PNE. O primeiro é descrito por um mapa que classifica a cobertura da superfície em função do tempo decorrido desde o último incêndio. As cicatrizes de incêndios mapeadas servem de base para essa classificação. Já a informação da disponibilidade de combustível pode ser avaliada em função das redes de aceiros e drenagem, considerando que onde ambos estiverem não há material combustível. A Figura 7 mostra um exemplo de mapa de acúmulo de distribuição de combustível sobre a superfície. As classes de acúmulo aqui escolhidas são: queimado há menos de 1 ano (CA 0), queimado entre 1 e 2 anos (CA 1), queimado entre 2 e 3 anos (CA 2), queimado entre 3 e 4 anos (CA 3), e queimado há mais de 4 anos (CA 4).

Como estamos lidando com várias classes de anos sem queima, deve-se associar valores da probabilidade de propagação a cada uma delas. Esses valores são aqui inferidos com base no valor do limiar de percolação e também usando o conceito que, quanto maior for o acúmulo de combustível na célula, mais intensamente ela queimará e mais provável será ela incendiar uma célula vizinha. A matriz resultante desses conceitos aparece na Figura 8 e contém as probabilidades de propagação entre cada par de classes de combustível. As colunas representam a classe de combustível da célula que está queimando, enquanto que as linhas correspondem às classes de combustível das células adjacentes que ainda não queimaram. Conforme observado nos incêndios mapeados, regiões queimadas há menos de um ano não possuem combustível seco acumulado suficiente para favorecer a propagação do fogo. Assim, o valor de probabilidade de propagação nessa classe de acúmulo é menor que o valor limiar  $I_c$ . Quanto maior o acúmulo de combustível, mais facilmente o fogo

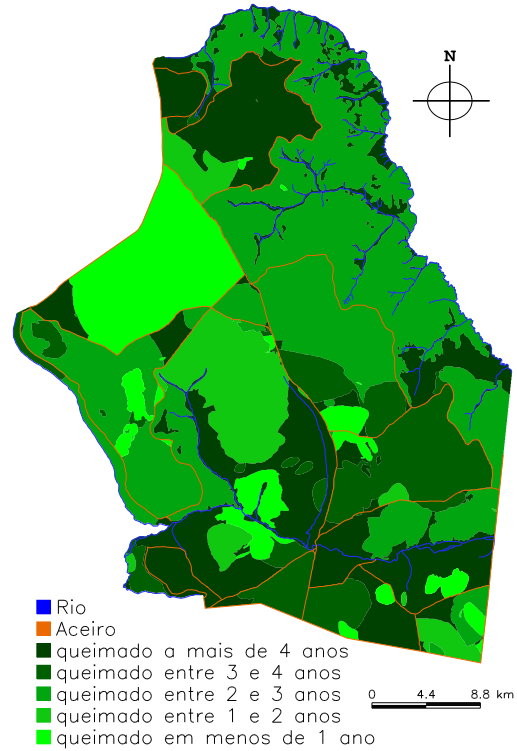


Figura 7: Mapa de acúmulo de combustível para o mês de junho de 2002.

se propaga e, logo, maior será o valor de  $I$ .

		QUEIMANDO				
		CA 0	CA 1	CA 2	CA 3	CA 4
INERTE	CA 0	0.100	0.250	0.261	0.273	0.285
	CA 1	0.113	0.253	0.264	0.276	0.288
	CA 2	0.116	0.256	0.267	0.279	0.291
	CA 3	0.119	0.259	0.270	0.282	0.294
	CA 4	0.122	0.262	0.273	0.285	0.297

Figura 8: Probabilidade de propagação do fogo entre as classes de acúmulo de material combustível. As cores das classes correspondem às mesmas da legenda da Figura 7.

### 3.2 Representando os efeitos do vento

De forma geral, quanto maior é a velocidade do vento, maiores serão a intensidade da queima e a velocidade de propagação do incêndio na direção do vento. Ou seja, o vento induz uma tendência de propagação do fogo [16]. Conforme relatado em [10], podemos dividir os efeitos da velocidade do

vento em três classes: ventos fracos (WS 0), com velocidades variando entre 0 a 5 km/h; ventos moderados (WS 1), com velocidades variando entre 5 a 20 km/h e; ventos fortes (WS 2), com velocidades maiores do que 20 km/h. Para cada uma dessas três classes de velocidades do vento, um *fator de tendência direcional*  $b_j$  é usado para modificar a probabilidade de propagação para as células vizinhas (ver Figura 9). Para WS 0 todos os fatores de tendência são iguais a 1. Valores maiores de velocidade do vento para WS 1 e WS 2 aumentam a probabilidade de propagação do fogo para células na direção do vento (ver Figura 9).



Figura 9: Representação dos fatores de tendências direcionais usado para simular os efeitos da direção do vento. Sem vento ou vento fraco (WS 0: 0-5 km/h), vento moderado (WS 1: 5 - 20 km/h) e vento forte (WS 2: maior que 20 km/h). A flecha indica a direção do vento. Para WS 0 todos os fatores de tendências são iguais a 1 (sem tendência). O vento pode ser simulado vindo de qualquer uma das oito direções através da rotação da matriz de fatores de tendências até que o maior fator está posicionado a favor do vento. Figura adaptada de [10].

Os valores das tendências  $b_j$  são utilizados para modificar  $I$  e assim produzir uma *probabilidade direcional de propagação do fogo corrigida para o vento*,  $i_{wj}$ , na  $j$ -ésima direção ( $j = 1, \dots, 8$ ). O ajuste é uma probabilidade binomial cumulativa:  $i_{wj} = 1 - (1 - I)^{b_j}$ , onde  $b_j$  é o fator de tendência direcional apropriado, obtido através de uma matriz de oito possíveis direções relativas do vento (ver Figura 9). A posição da célula não queimada adjacente relativa a célula que está queimando determina qual fator de tendência é utilizado. Quando não existe vento,  $b = 1$  e  $i_{wj} = I$ .

## 4 Simulações e Resultados

O modelo computacional foi desenvolvido no TerraME (*Terra Modelling Environment*), um ambiente de modelagem integrado a um sistema de

informações geográficas, proposto por [5], que oferece uma linguagem de alto-nível para descrição de modelos baseados em espaços celulares. A estrutura do TerraME é mostrada na Figura 10. A principal parte desse ambiente é o *interpretador TerraME*. Ele lê o código-fonte do modelo escrito na linguagem de modelagem TerraME (uma extensão da linguagem de programação LUA [11]) e chama funções no TerraME *framework*. Esse *framework* compreende um conjunto de módulos escritos em C++ que fornecem funções e classes para modelagem dinâmica espacial e interação com um banco de dados espaciais da biblioteca TerraLib. A TerraLib é uma biblioteca de sistema de informações geográficas para o gerenciamento de banco de dados espaciais [4]. Os atributos ambientais são extraídos do banco de dados e carregados na memória para serem utilizados durante a simulação do modelo. Os resultados obtidos na simulação são armazenados no banco de dados. A aplicação TerraView, desenvolvida sobre a biblioteca TerraLib, é utilizada para a criação do espaço celular, para a visualização e para a análise dos resultados obtidos.

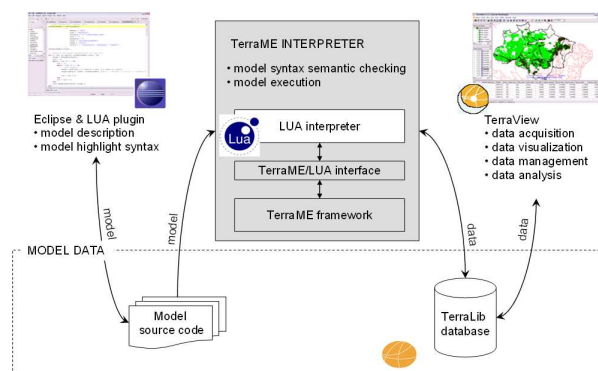


Figura 10: O ambiente de modelagem TerraME. Figura extraída de [5].

Aqui serão apresentadas simulações de dois cenários de incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas, conforme destacado na Figura 11 (indicados pelas setas vermelhas). Para se descobrir maiores informações sobre os incêndios, como data de início e fim e condições atmosféricas durante a ocorrência, combinou-se informações dos mapas de cicatrizes de incêndios, dados de focos de calor gerados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), relatórios de ocorrência de incêndios emitidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis) e dados meteorológicos registrados por duas plataformas de coleta de dados, uma no próprio Parque e outra na

cidade de Chapadão do Céu, estado de Goiás, situada a cerca de 30 km da sede do Parque.

Através de consultas sobre o banco de dados geográficos obteve-se as seguintes informações dos incêndios:

A) Incêndio 1 (indicado na Figura 11(a)):

- Local de início: desconhecido;
- Data: 06-01-2000;
- Velocidade média do vento: 17 km/h (ventos moderados - WS1)
- Direção do vento: leste

B) Incêndio 2 (indicado na Figura 11(b)):

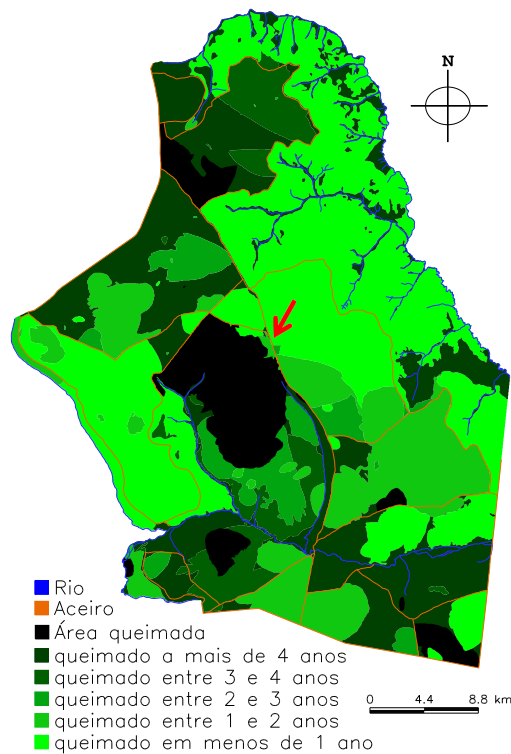
- Local de início: desconhecido
- Data: 09-07-2002
- Velocidade média do vento durante a ocorrência: 35 km/h (ventos fortes - WS2)
- Direção do vento: nordeste

O local onde começou o incêndio é uma informação muito difícil de ser obtida, pois os incêndios são mapeados através de cicatrizes encontradas em imagens de satélite. Dados de focos de calor, obtidos de imagens termais de satélites de baixa resolução espacial, não são precisos o suficiente para se dizer onde ocorreu o foco.

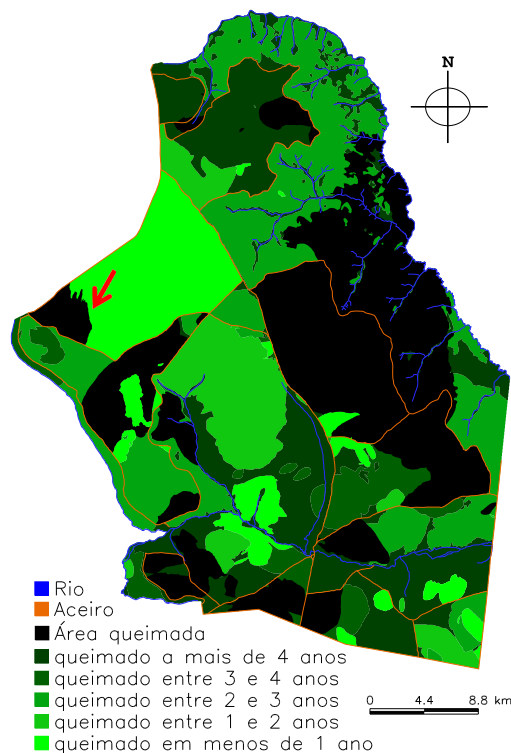
A princípio, deve-se indicar como condição inicial qual célula (ou conjunto de células) está queimando. Essa escolha é feita aqui por hipótese, levando em conta a direção do vento e a extensão da área queimada. Após estabelecida a condição inicial, o modelo prevê o avanço da frente de fogo como um evento estocástico. As Figuras 12 e 13 apresentam a evolução dos cenários simulados para os dois incêndios.

Percebe-se nas simulações apresentadas nas Figuras 12 e 13 que algumas células não queimaram durante a propagação do fogo. Isso se dá devido à natureza estocástica do modelo. A probabilidade atribuída se relaciona ao número de células vizinhas que serão ignizadas por uma célula que está queimando a cada iteração. Para um máximo valor de probabilidade ( $p = 1, 0$ ), todas as células vizinhas serão levadas à ignição.

Observa-se que o modelo apresenta distintos comportamentos da frente de fogo, dependendo da classe de distribuição de combustível na qual a célula se encontra. Células com alto acúmulo



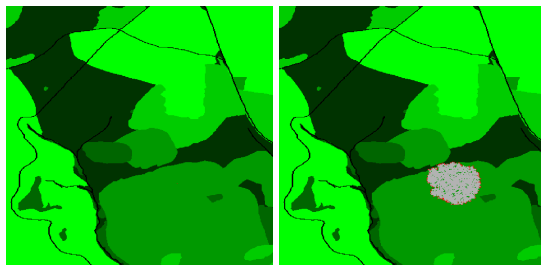
(a)



(b)

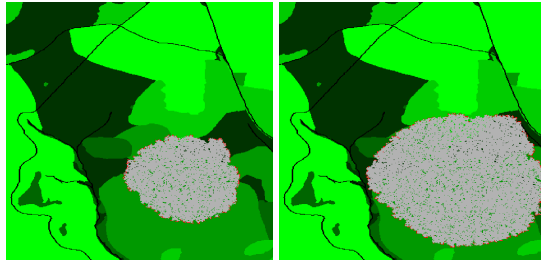
Figura 11: Incêndios mapeados para o período (a) Junho de 2001 a Maio de 2002 e (b) Junho de 2002 a Maio de 2003 e suas respectivas classes de acúmulo de combustível para antes do período de mapeamento. Setas vermelhas indicam os incêndios simulados.





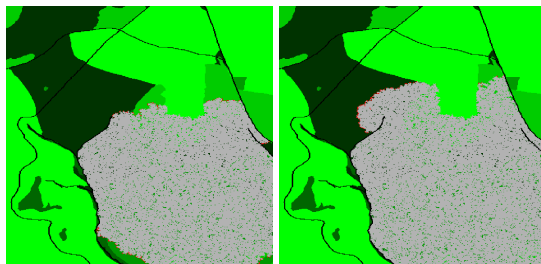
(a) iteração 0

(b) iteração 50



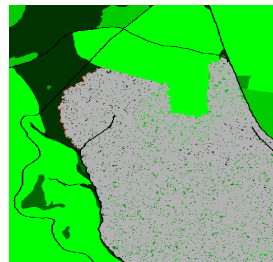
(c) iteração 100

(d) iteração 150



(e) iteração 200

(f) iteração 250



(g) iteração 300

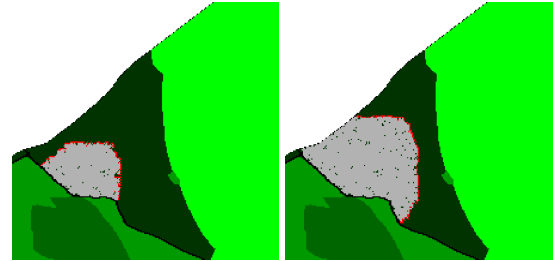
Figura 12: Sucessivos cenários de propagação previstos pelo modelo para o incêndio 1. Células cinza estão queimadas e vermelhas estão queimado no instante de tempo. As classes de distribuição de combustível são as mesmas conforme mostradas na Figura 11(a). As probabilidades de propagação utilizadas são mostradas na Figura 8.

de material combustível apresentam maior facilidade de propagação do fogo, enquanto que células com baixo acúmulo favorecem a estagnação da propagação. As probabilidades direcionais induzem uma deformação da frente de fogo, favorecendo uma maior facilidade de propagação na direção do vento. Esse efeito pode ser evidenciado na Figura 13, onde a frente de fogo apresenta uma



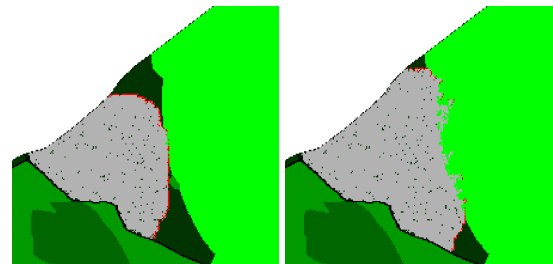
(a) iteração 0

(b) iteração 20



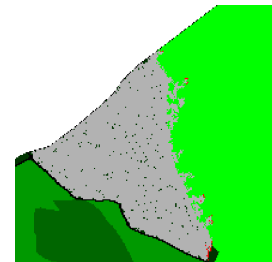
(c) iteração 40

(d) iteração 60



(e) iteração 80

(f) iteração 100



(g) iteração 120

Figura 13: Sucessivos cenários de propagação previstos pelo modelo para o incêndio 2. Células cinza estão queimadas e vermelhas estão queimado no instante de tempo. As classes de distribuição de combustível são as mesmas conforme mostradas na Figura 11(b). As probabilidades de propagação utilizadas são mostradas na Figura 8.

forma elíptica, indicando uma maior facilidade de propagação na direção do vento, que sopra para a direção leste.

## 5 Conclusões

O modelo utilizado neste trabalho se baseia na teoria da percolação. Os valores de probabili-

dade podem ser inferidos a partir de uma base de dados com histórico de incêndios ao longo dos anos e também com informações referentes aos fatores ambientais que, evidentemente, influenciam na propagação do fogo. Os valores supostos para as probabilidades de propagação utilizados neste trabalho foram escolhidos também com base em evidências relacionadas às classes de anos sem queima. Observou-se que regiões queimadas há menos de um ano não propagavam o fogo e, à medida que o tempo desde o último incêndio aumenta, a propagação é mais intensa. Esses valores serão substituídos por outros mais coerentes, obtidos através de correlações empíricas extraídas dos dados históricos e que levem em conta melhores efeitos do combustível, como curvas de acúmulo de biomassa seca, dominância de espécies e tipo de vegetação (ou tipo fitofisionômico).

A dominância, ou não, do capim-flecha (*tristachya leiostachya* Ness) é uma informação relevante para modelar a dinâmica do fogo no PNE. Esta gramínea, pelas suas características fenológicas e alta densidade, tem a capacidade de tornar o ambiente mais susceptível à ocorrência de incêndios intensos [17]. Assim, curvas de acúmulo de biomassa seca para regiões com e sem o capim-flecha fornecem informações adicionais para ajuste das probabilidades. Um outro fator que deve ser considerado é a classificação da vegetação do Parque, como por exemplo, em função dos tipos fitofisionômicos.

Para efetuarmos simulações que podem ser relacionadas ao tempo real de ocorrência do incêndio, associaremos cada iteração do modelo a um *intervalo de tempo*  $\Delta t$  e incluiremos no modelo um *tempo de queima da célula* (que depende de fatores como velocidade do vento e classe de acúmulo de combustível da célula). A possibilidade do fogo avançar de uma célula para a sua vizinha só será avaliada após ultrapassado o tempo de queima da célula. Com esse caráter dinâmico, podemos incluir no modelo eventuais mudanças na velocidade e direção do vento, possibilitando a simulação de cenários mais realísticos.

A manutenção anual da rede de aceiros é essencial para que os incêndios não atinjam grandes proporções do Parque, delimitando-os a blocos. Percebe-se no incêndio identificado pela seta azul na Figura 3(b) que o aceiro não foi eficaz. O estado da manutenção dos aceiros pode ser incluído no mapa de disponibilidade de combustível, associando-se a cada célula aceiro o tempo decor-

rindo desde a última manutenção. Assim, podemos considerar ineficazes trechos de aceiro cujo tempo desde a última manutenção ultrapassou um ano.

O ambiente de modelagem utilizado mostrou-se bastante robusto e possibilita a comunicação do modelo com um banco de dados geográficos que fornece os atributos utilizados na simulação. O TerraME pode então servir de base para o desenvolvimento de um aplicativo que auxilie na tomada de decisões em atividades relacionadas ao manejo do fogo em unidades de conservação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte à execução deste trabalho.

## Referências

- [1] BERJAK, S. G.; HEARNE, J. W. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. **Ecological Modelling**, v. 148, p. 133–151, 2002.
- [2] BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- [3] CÂMARA, G.; SOUZA, R.; FREITAS, U.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. Spring: Integrating remote sensing and gis with object-oriented data modelling. **Computers and Graphics**, v. 15, n. 6, 1996.
- [4] CÂMARA, G., R. SOUZA, et al. (2000). TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation. **II Brazilian Symposium in Geoinformatics**, GeoInfo2000, São Paulo.
- [5] CARNEIRO, T. G. d. S. **Nested-ca: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change**. 107 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

- [6] DUARTE, J.; TÉPHANY, H.; NAHMIAS, J. Percolation and fire spread. In: VIEGAS, D. X. (Ed.). **III International Conference on Forest Fire Research**. Luso, Portugal, 1998. v. 1, p. 361–362.
- [7] FAVIER, C. Percolation model of fire dynamics. **Physics Letters A**, v. 330, p. 396–401, 2004.
- [8] FRANÇA, H.; SETZER, A. **Regime das queimadas no Parque Nacional das Emas, GO: 1973-1995**. Relatório de Pesquisa FAPESP: Processo n. 95/2674-9, 1997.
- [9] FRANÇA, H.; Ramos-Neto, M. B.; SETZER, A. O fogo no Parque Nacional das Emas. In: **Biodiversidade**. Brasília, DF, Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2007.
- [10] HARGROVE, W. W.; GARDNER, R. H.; TURNER, M. G.; ROMME, W. H. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. **Ecological Modelling**, v. 135, p. 243–263, 2000.
- [11] IERUMSALIMSCHY, T.; FIGUEIREDO, L. H.; CELES, W. Lua - an extensive extension language. **Software: Practice & Experience**, v. 26, p. 635–652, 1996.
- [12] KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A. A model for predicting fire spread using cellular automata. **Ecological Modelling**, v. 99, p. 87–97, 1997.
- [13] MORAIS, M. **Comparing spatially explicit models of fire spread through chaparral fuels: A new model based upon the Rothermel fire spread equation**. Dissertação (Mestrado) — University of California, Santa Barbara, CA, USA, 2001.
- [14] NAHMIAS, J.; TÉPHANY, H.; DUARTE, J.; LETACONNOUX, S. Fire spreading experiments on heterogeneous fuel beds. Applications of percolation theory. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 1318–1328, 2000.
- [15] PASTOR, E.; ZÁRATE, L.; ARNALDOS, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, 2003.
- [16] PYNE, J. S.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2nd. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.
- [17] Ramos-Neto, M. B. **O Parque Nacional das Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica**. 159 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [18] Stauffer D. and Aharony A., **Introduction to Percolation Theory** (Taylor and Francis, London) 1991.