

# *Simulação de fogos florestais. Base para um sistema geo-temporal.*

Filipe Xavier Catry, Maria José Perestrello de Vasconcelos,  
António Gonçalves, José U. Paúl, Manuela Baptista



*Ingenium*

1999

**Referência:** Catry, F.X.; Vasconcelos, M.J.P.; Gonçalves, A.; Paúl, J.U. & Baptista, M. (1999). Simulação de fogos florestais – Base para um sistema geo-temporal. *Ingenium*, II Série, Vol. 40: 92-98.



## ***Simulação de fogos florestais\*.*** ***Base para um sistema geo-temporal.***

**Filipe Xavier Catry<sup>1</sup>, Maria José Perestrello de Vasconcelos<sup>1,2,3</sup>, António Gonçalves<sup>2</sup>,  
José U. Paúl<sup>1</sup>, Manuela Baptista<sup>4</sup>**

<sup>(1)</sup> Centro Nacional de Informação Geográfica, <sup>(2)</sup> Centro de Estudos Florestais ISA, <sup>(3)</sup> Autor para correspondência, Instituto de Investigação Científica Tropical, <sup>(4)</sup> Direcção Geral das Florestas.

### **RESUMO**

O objectivo do trabalho aqui apresentado é o desenvolvimento de um programa para computador que prevê e simula graficamente a propagação de fogos florestais. Em paralelo, avalia-se o grau de fiabilidade das previsões através da comparação de incêndios reais com as respectivas simulações.

O programa *Geofogo* expande para situações espacialmente heterogéneas modelos de cálculo do comportamento do fogo disponíveis para situações homogéneas. O *Geofogo* é desenvolvido seguindo uma lógica de emulação de multiprocessamento em PCs e em computadores portáteis e recorre a interfaces gráficas amigáveis integrando muitas das funções normalmente disponíveis nos sistemas de informação geográfica.

Para avaliação da fiabilidade do simulador, foram compiladas bases de dados geográficas digitais que incluem todos os dados necessários à realização das simulações com base em dados reais. Estes dados incluem mapas topográficos, mapas de combustível, dados meteorológicos, a localização de pontos de início dos fogos, posições de frentes de chamas e respectivos instantes associados, e perímetros finais dos fogos. A maior parte dos dados sobre combustíveis, dados meteorológicos, e dados sobre localização dos fogos foram recolhidos no terreno durante duas épocas de fogos.

Os resultados das comparações de 15 fogos reais com as respectivas simulações no programa *Geofogo* revelam uma boa aderência das previsões relativamente aos percursos varridos pelos fogos. Da análise dos dados disponíveis concluímos que o programa pode ser utilizado, no presente estado de desenvolvimento, para gestão do perigo de incêndio, planeamento florestal, educação, e realização de projecções para apoio ao combate de grandes incêndios.

---

\* Projecto PAMAF 4037

## INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais são como se sabe, um fenómeno frequente em Portugal; entre 1990 e 1997 os incêndios destruíram no nosso país uma área média anual de cerca de 100 mil hectares de floresta e matos (D.G.F., 1997), representando importantes perdas em termos económicos e ecológicos. A necessidade de definir e aplicar acções cada vez mais eficazes, ao nível do combate e sobretudo da prevenção, levou o Centro Nacional de Informação Geográfica, a Direcção Geral das Florestas e o Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia, a desenvolver um projecto intitulado *Geofogo* – Simulação da propagação de fogos florestais.

O projecto *Geofogo* tem como objectivo desenvolver e testar um programa para computador, que permita simular e analisar o comportamento potencial de fogos florestais. Este programa consiste numa aplicação autónoma, aberta, com as funcionalidades de um sistema de informação geográfica (SIG) operacional no sistema *Windows*. Para além de simular a progressão de fogos, o programa *Geofogo* produz mapas de perigo de incêndio e mapas com estimativas das características do fogo para determinadas condições meteorológicas. A informação produzida permite apoiar a decisão em questões de minimização do perigo de incêndio, através da quantificação dos benefícios resultantes da implementação de diferentes estratégias de gestão de combustíveis.

A avaliação da fiabilidade do simulador é efectuada através da comparação entre incêndios reais e as respectivas simulações. Para esse efeito, várias equipas de técnicos trabalharam no terreno durante duas épocas de fogos, no sentido de recolher dados sobre incêndios florestais reais. Esta informação (constituída essencialmente por registos dos pontos de início dos fogos, perímetros, modelos de combustível e registos meteorológicos), juntamente com a informação topográfica, informação meteorológica adicional, e com a cartografia de combustíveis produzida, foi tratada e compilada de forma a constituir a base de dados digital necessária à realização das simulações.

Para além destes aspectos é estudada e testada uma aproximação à construção de um sistema de informação geo-temporal. Pretende-se integrar metodologias que conduzam ao desenvolvimento de um sistema capaz de suportar simulações de qualquer fenómeno espacial e dinâmico, onde todos os objectos funcionam como peças geo-referenciadas que podem evoluir numa base de tempo contínua, e cujo estado pode ser continuamente inspeccionado.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Desenvolvimento do sistema *Geofogo*

O desenvolvimento do sistema *Geofogo* baseia-se em três linhas principais:

- 1) Ligação de modelos e algoritmos com expansão para situações espacialmente heterogéneas de um modelo de previsão das características do fogo, disponível para situações homogéneas (Rothermel, 1972, 1983; Salazar and Palmer, 1987; Vasconcelos and Guertin, 1992);

- 2) Formalização da componente geo-temporal através da especificação e programação de um sistema de eventos discretos, modular, hierárquico, e orientado por objectos, para a realização de simulações de um processo dinâmico no espaço (Vasconcelos *et al.*, 1994);
- 3) Programação de uma aplicação autónoma, aberta, de interface gráfica amigável, e concebida para funcionar em computadores pessoais sobre plataforma *Windows*, com integração de funcionalidades normalmente disponíveis nos sistemas de informação geográfica (SIG).

## **1. Ligação de modelos e algoritmos**

Os modelos utilizados pelo Geofogo são os seguintes:

- a) Modelo de cálculo das características do fogo – Modelo de Rothermel (1972, 1983).
- b) Modelo de cálculo da humidade dos combustíveis mortos – Existem dois algoritmos alternativos; o primeiro é o algoritmo apresentado em Rothermel (1983), e o segundo é uma modificação do algoritmo proposto por Rothermel *et al.* (1986), por nós denominado FPMC modificado.
- c) Modelo de ventos – Os algoritmos utilizados são os apresentados por Rothermel (1983) e por Andrews (1986).
- d) Modelos de combustível aplicáveis aos vários tipos de vegetação presentes no terreno (Anderson, 1982; ICONA, 1990)
- e) Algoritmos de contágio de fogo em espaço celular (Feunekes, 1992)

Os modelos e algoritmos foram programados e testados para realizarem os cálculos em grelhas de dados. Cada célula da grelha corresponde a uma parcela de terreno que se considera homogénea e assim, para cada célula da base de dados podem ser calculadas e cartografadas as características do fogo. Foram feitos testes de verificação dos cálculos realizados sobre mapas (codificados em forma de grelha) e foram identificados os pontos onde eram possíveis e/ou necessárias melhorias. As alterações correspondentes a essas melhorias foram introduzidas, e em alguns casos foi incluída a possibilidade de se poder optar por algoritmos de cálculo diferentes, e de ver em simultâneo várias simulações do mesmo fogo.

## **2. Formalização da componente geo-temporal**

Na formalização da componente geo-temporal recorre-se a teoria de sistemas, a teoria de modelação e simulação, à especificação de sistemas de eventos discretos, e a conceitos de inteligência artificial (Zeigler, 1976; Zeigler, 1990; Vasconcelos and Zeigler, 1993; Vasconcelos *et al.* 1995). Para simular a progressão de fogos, o espaço é discretizado e concebido como uma grelha de células. Além da localização geográfica e dos respectivos atributos, cada célula é também um potencial processador, autónomo e independente, com sequências de estado definidas por regras que dependem da activação, do tempo decorrido e da interacção com as células vizinhas. As sequências de estado processam-se numa base de tempo contínua, não havendo necessidade de recorrer aos tradicionais passos de tempo para representar o seu avanço na simulação.

A cada célula corresponde um conjunto de atributos (de topografia e vegetação) que permite calcular as características de um fogo que aí ocorra de acordo com as condições meteorológicas vigentes. O conhecimento da taxa de propagação de uma determinada célula permite calcular o tempo de residência do fogo nessa célula e portanto, uma vez conhecido o instante de ignição, permite calcular o instante no qual se efectuará o contágio das células vizinhas. Assim, é possível gerar o segmento de tempo ( $t$ ) correspondente a uma fase “a arder” de uma determinada célula. Uma vez decorrido esse tempo, as células suas vizinhas são contagiadas, sendo por sua vez nelas gerado o respectivo ( $t$ ). Temos assim numa grelha que representa no espaço em análise um conjunto de processadores activos correspondentes às células em combustão com os seus respectivos ( $t$ ), os quais variam de célula para célula e dependem da direcção do contágio e da direcção de máxima propagação.

Os processadores são activados por ignição/contágio passando da fase “passivo” para a fase “a arder” e desactivados quando há a transição da fase “a arder” para “ardido”. Assim, define-se um modelo de estrutura que varia ao longo do tempo, pois tem um número de componentes (processadores com os seus respectivos relógios internos), sempre ajustado às necessidades de cada simulação em curso. É este aspecto que permite emular um processamento paralelo em computadores pessoais pois apenas um subconjunto das extensas grelhas que representam o espaço real é referenciada, e apenas nos instantes correspondentes às transições de estado. Esta aproximação representa um desenvolvimento sobre a teoria de autómatos celulares e, ao contrário destes, funciona por eventos, sem iteração, e numa base de tempo contínua. Estes aspectos optimizam o tempo de computação pois evitam a necessidade de monitorização iterativa dos estados da totalidade das células da grelha. Cada processador inicializado é um modelo atómico (Zeigler, 1976, 1990)

### 3. Programação

Para responder às necessidades de simulação acima descritas, à evolução da interface gráfica, e à manutenção face a erros, optou-se por utilizar o paradigma da programação modular orientada por objectos: linguagens C++ e Object Pascal. A programação do *Geofogo* é totalmente modular, hierárquica e orientada por objectos sendo a estrutura interna de funcionamento concebida para se adaptar facilmente a uma plataforma de multiprocessamento. Os quatro módulos mais importantes são o de cálculo das características do fogo, o módulo de simulação, o de interface gráfica, e o de armazenamento e manipulação de atributos espaciais. Desta forma, todos os algoritmos podem ser aperfeiçoados, ou mesmo substituídos, sem alteração da componente visual onde são utilizados.

## Avaliação da fiabilidade das previsões

### 1. Recolha e tratamento de dados sobre incêndios

Paralelamente ao desenvolvimento da aplicação, procura-se avaliar o grau de fiabilidade do simulador, através da comparação de simulações com situações reais de incêndio. Para esse efeito foi seleccionada uma área de estudo situada na região Centro-Norte de Portugal abrangendo (total ou parcialmente) 22 concelhos incluídos na área de influência da Direcção Regional de Agricultura da Beira Litoral. Foi compilada informação geográfica de base para esta área e foram produzidos, em formato de grelha e com uma resolução de 25 metros, os mapas digitais necessários à simulação dos fogos. A partir do mapa digital de base relativo à altimetria (formato vectorial) gerou-se, por rasterização e interpolação, um modelo digital de terreno para a área de estudo, a partir do qual se extraíram os temas declive e exposição. Foram também tratados e introduzidos na base de dados os mapas de estradas, rede hidrográfica, concelhos, e cartas militares correspondentes à área de estudo definida.

Durante as épocas de fogos de 1996 e 1997, várias equipas compostas por técnicos contratados para o projecto, investigadores e técnicos pertencentes às três instituições envolvidas, guardas florestais, e bombeiros, trabalharam na recolha de dados e acompanharam no terreno quarenta e três fogos florestais (Figura 1). O trabalho de campo consistiu na recolha de informação relativa a: condições meteorológicas e suas variações enquanto os fogos decorriam (temperatura, humidade relativa, direcção e velocidade do vento); localização de pontos de início dos fogos, posições de frentes de chamas e respectivos instantes associados; perímetros finais dos fogos, e distribuição espacial das principais manchas de combustíveis. Os dados resultantes do acompanhamento destes fogos foram tratados para se apurar quais os eventos que possuíam um volume de dados suficiente para a aplicação e teste do simulador.



A cartografia de combustíveis foi produzida, para as áreas percorridas pelos fogos seleccionados e zonas envolventes, com recurso a fotointerpretação (ampliações de fotografia aérea à escala 1:10 000 e a ortofotos digitais de data anterior à ocorrência dos incêndios), e com recurso a verificações de campo. Os restantes dados relativos aos fogos seleccionados foram digitalizados e incluídos na base de dados geográfica para serem utilizados na fase de teste e comparação do comportamento do fogo simulado com o seu comportamento real.

Em 1998, por dificuldades diversas não se efectuou trabalho de campo, e recorreu-se a uma metodologia complementar no sentido de tentar aumentar o número de fogos da amostra. Para o desenvolvimento desta metodologia, procedeu-se da seguinte forma:

- a) Foram analisadas todas as Fichas de Determinação das Causas dos Incêndios recolhidas pelas Brigadas de Investigação de Fogos Florestais (BIFF) na área de estudo durante os anos de 1996 e 1997, e seleccionados os incêndios investigados cuja área ardida fosse igual ou superior a 5 hectares e relativamente aos quais existisse informação relativa ao local e hora de início do fogo.
- b) Para cada um dos incêndios seleccionados, foi produzida cartografia local de combustíveis, e foi compilada a informação meteorológica recolhida na estação sinóptica mais próxima.

A tabela 1 mostra a desproporção entre o número de fogos relativamente aos quais se recolheram dados e aqueles que foram seleccionados para os testes. É patente que o facto de um fogo ser acompanhado no terreno pelas equipas não garante de forma alguma que os dados pretendidos venham a ser obtidos. Este facto deve-se a diversos factores tais como: existência de muitos fogos com dimensão e duração demasiado reduzidas; problemas de visibilidade e localização das frentes de chamas causadas pela topografia e pelo fumo; impossibilidade de obter uma localização do ponto de início e respectiva hora com precisão suficientes; falhas na recolha de dados meteorológicos por funcionamento deficiente do equipamento, e falhas nos dados do Instituto de Meteorologia.

**Tabela 1:** Informações relativas ao número de fogos estudado.

	Ano	Nº de Fogos acompanhados pelas equipas do <i>Geofogo</i>	Nº de Fichas (BIFF) analisadas	Nº de Fogos seleccionados
<b>Acompanhamento directo de fogos</b>	1996	23	-	<b>6</b>
	1997	20	-	<b>4</b>
<b>Metodologia complementar</b>	1998	-	Algumas centenas	<b>5</b>

Nos 10 incêndios seleccionados resultantes do acompanhamento pelas equipas móveis no terreno, determinou-se o local e hora de ignição com base nas informações recolhidas pelo Centro de Coordenação Operacional de Viseu (CCO), Centro de Prevenção e Detecção (CPD03), corporações de bombeiros presentes no local, ou ainda nas observações das equipas do *Geofogo*; o perímetro final de cada fogo foi recolhido pelas equipas com recurso a GPS (Global Positioning System) ou através de desenho sobre cartas militares e ampliações de fotografias aéreas; os dados meteorológicos foram recolhidos *in loco* pelas equipas do *Geofogo* com recurso a Kits meteorológicos portáteis e a uma estação meteorológica semi-portátil, tendo sido utilizados também dados da estação sinóptica de Viseu do Instituto de Meteorologia. Apenas para um reduzido número de fogos foi possível elaborar mapas de progressão onde se inclui o avanço progressivo das várias frentes de fogo ao longo do tempo. Nos 5 incêndios obtidos através da metodologia complementar utilizada em 1998, os dados sobre o local de início, hora de início, perímetro final e hora final são os que constam nas Fichas de Determinação das Causas dos Incêndios, das Brigadas de Investigação de Fogos Florestais da DGF; relativamente aos dados meteorológicos, utilizaram-se os registos do Instituto de Meteorologia.

## 2. Comparação de progressões simuladas com as progressões reais

Realizaram-se testes comparativos entre os 15 fogos reais seleccionados e as respectivas simulações, analisando um conjunto de aspectos que constituíram a nossa janela de experimentação e que, por nível hierárquico, se definem da seguinte forma:

- 1º) Avaliação da implementação do modelo teórico (testar se o simulador reproduz correctamente as formas teóricas esperadas em condições completamente controladas).
- 2º) Avaliação da direcção geral de propagação (avaliar se as simulações de fogos reais decorrem com progressões orientadas correctamente).
- 3º) Avaliação dos percursos (verificar se as áreas percorridas pelo fogo na simulação correspondem aproximadamente às percorridas na realidade).
- 4º) Avaliação de formas finais e áreas ardidas (verificar se as áreas estimadas são aproximadas das áreas que efectivamente arderam e se as formas finais dos fogos simulados são semelhantes às dos fogos reais).
- 5º) Avaliação espaciotemporal (comparar, no tempo, a posição sucessiva das frentes de chamas dos fogos simulados com as dos fogos reais).

Relativamente às formas finais dos fogos reais e respectivas simulações foram realizadas as análises abaixo listadas:

- Comparação do número de células ardidas no fogo simulado e no fogo real
- Comparação das percentagens de coincidência, comissão e omissão, através de uma tabela de contingência do tipo da tabela 2.
- Comparação de índices de forma:  
Quociente de forma =  $\text{Área} / (\text{Eixo maior}^2)$ , com um valor máximo aproximando 1 para rectângulos  
Circularidade =  $\sqrt{\text{Área} / (\text{Pi} * \text{Raio Max}^2)}$ , com o valor máximo aproximando 1 para círculos  
Orientação =  $\arccos(\text{correlação entre as coordenadas X e Y do perímetro})$   
Alongamento = eixo menor / eixo maior, variando entre 0 e 1

**Tabela 2:** Exemplo dos cálculos efectuados para comparação das simulações com os respectivos fogos reais.

SIMULAÇÃO	REALIDADE	
	Células não ardidas	Células ardidas
Células não ardidas	P	Y
Células ardidas	U	V
TOTAL	Z	X

$$\% \text{ Coincidência} = V/X * 100$$

$$\% \text{ Comissão} = U/X * 100$$

$$\% \text{ Omissão} = Y/X * 100$$



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

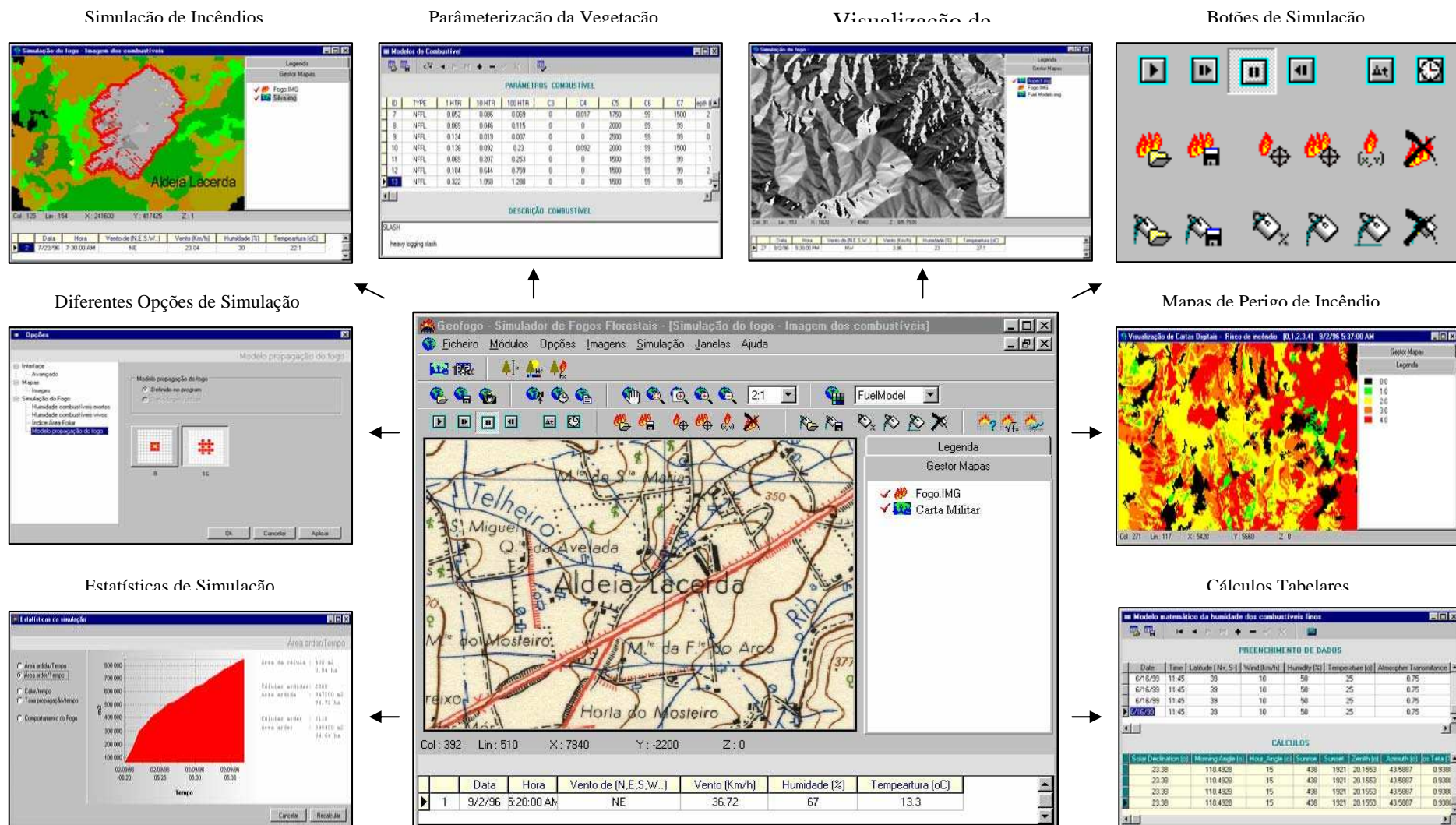
### O *Geofogo*

O Simulador de fogos florestais tem duas características básicas. Uma é a capacidade de funcionar como SIG e a outra é a de simular o comportamento do fogo (módulos básicos). Adicionalmente estão disponíveis três módulos que possibilitam o desenvolvimento de novos modelos de combustível e o cálculo de outras características do fogo (módulos avançados).

O simulador necessita de dados geo-referenciados integrados num sistema de informação geográfica. As simulações mostram a evolução do perímetro do fogo e a correspondente área ardida ao longo do tempo e os mapas com as previsões de área ardida podem ser armazenados em qualquer instante utilizando o mesmo formato SIG. É igualmente possível obter mapas temáticos com as características do fogo previstas pelo modelo para as condições meteorológicas vigentes, tais como a taxa de propagação, o comprimento das chamas, ou o índice de perigo de incêndio. Como se trata de um sistema aberto, estes mapas podem ser guardados e combinados entre si fora do sistema do simulador por forma a obter mais informação com interesse estatístico. Assim, o *Geofogo* pode ser utilizado para estudar várias opções de gestão da vegetação e de alocação de infra-estruturas, pois fornece de forma imediata o perigo de incêndio associado a cada opção e apoia o utilizador nas avaliações de custos/benefícios.

O modelo de comportamento do fogo correntemente utilizado no *Geofogo* não é aplicável a fogos de copas e não inclui ainda um modelo do efeito de *spotting* (ignição para além da frente de chamas provocada pela emissão de fagulhas). Deste modo o simulador pressupõe a existência de continuidade horizontal de combustíveis. Além disso, o modelo prevê a progressão de fogos em condições naturais não incluindo um tratamento do efeito retardador provocado pelos diferentes tipos de combate. Este efeito pode ser emulado através da introdução de barreiras no mapa de simulação às quais o utilizador associa uma determinada percentagem de decréscimo da taxa de propagação; por outro lado o efeito de *spotting* pode ser emulado através da introdução por parte do utilizador de vários pontos de ignição a horas diferentes.

O interface gráfico é baseado no interface do sistema *Windows* - janelas, ícones e menus. As opções (ferramentas para o utilizador) são apresentadas em função do módulo utilizado. Basicamente existem dois tipos de opções: ferramentas para manipular imagens (operadores SIG) e ferramentas para fazer a simulação do fogo - ver figura 2.



**Figura 2:** Interface e algumas das funcionalidades do programa Geofogo.

## Os testes de fiabilidade

Os testes foram realizados para a janela de experimentação acima definida apenas até ao 4º nível. No 5º nível de fiabilidade, o mais exigente, pretendia-se avaliar a coincidência entre a localização das frentes de chamas prevista pelo simulador ao longo do tempo e sua localização real; no entanto, as dificuldades de recolha destes dados no terreno com precisão suficiente, não permitiu proceder a esta análise para um número significativo de casos. Os resultados apresentados correspondem a uma análise da coincidência na forma e dimensões entre os fogos reais e os fogos simulados ao fim de um período de tempo que corresponde à duração total do fogo, ou a uma parte do mesmo para a qual existem os dados necessários.

Os resultados revelam um bom nível de aderência das previsões relativamente às áreas percorridas pelos fogos. Os testes realizados, por comparação da progressão de fogos reais com fogos simulados nas mesmas condições, permitem concluir que o simulador prevê, na grande maioria dos casos, progressões do fogo que correspondem às realmente ocorridas; de facto 11 dos 15 fogos testados atingem o 4º nível da nossa janela de experimentação.

Com a excepção de três casos que abaixo se discutem, todas as diferenças de coincidência mais significativas (>40%) entre o fogo simulado e a realidade (tabela 3 e figura 3) podem ser explicadas pela actuação dos meios de combate. De facto, as diferenças relevantes entre fogos simulados e reais correspondem sistematicamente a erros de comissão (isto é áreas que se prevê arderem e que não arderam na realidade), sendo os erros de omissão comparativamente baixos. Os erros de comissão estão regra geral associados ao avanço na simulação de flancos que na realidade foram combatidos e contidos por contra-fogo ou outros meios de combate (por exemplo os fogos de Fagilde e de Sobral). Nestes casos, e embora os índices finais de forma não apresentem uma boa correspondência, a aderência entre o simulado e o previsto nas outras frentes do fogo mantém-se muito aceitável.

Há que referir que em alguns dos casos estudados não foi possível simular a totalidade do incêndio. Por exemplo, no caso de Vila Mendo, embora o fogo tenha decorrido durante dois dias consecutivos apenas foi possível simular alguns períodos nos dois dias, o que foi condicionado pela disponibilidade de dados meteorológicos. Assim, a área final usada para as comparações é bastante menor do que a real. Além disso, neste caso (como noutros, por exemplo Mezio) o desconhecimento de pontos de ignição levou-nos à sua substituição por frentes de chamas com posição e hora conhecidas. Isto implica que parte do perímetro ardido (que fica para trás destas frentes) tenha de ser ignorado nas análises efectuadas.

**Tabela 3:** Resumo dos resultados obtidos – Tabelas de contingência e índices de forma.

INCÊNDIOS ESTUDADOS		ÁREA ARDIDA (ha)	TABELAS DE CONTINGÊNCIA			ÍNDICES DE FORMA			
			% de Coincidência	Erro de Comissão (%)	Erro de Omissão (%)	Quociente de forma	Circularidade	Orientação	Alongamento
SILVÃ	Realidade	281.4	76.2	5.4	23.8	0.483	0.643	106.590	0.824
	Simulação	229.6				0.588	0.756	106.804	0.975
MEZIO	Realidade	170.0	89.2	17.7	10.8	0.664	0.748	100.072	0.938
	Simulação	181.7				0.667	0.856	87.309	0.985
VILA MENDO	Realidade	482.0	69.6	14.4	30.4	0.405	0.561	63.320	0.862
	Simulação	404.5				0.489	0.775	85.149	0.678
Srª da OUVIDA	Realidade	70.0	15.0	80.7	85.0	0.365	0.573	57.554	0.700
	Simulação	67.0				0.529	0.755	95.475	0.911
ALMOFA-LA	Realidade	163.8	85.9	42.4	14.1	0.297	0.547	56.496	0.670
	Simulação	210.2				0.336	0.602	65.046	0.580
NESPERI-DO	Realidade	74.0	64.1	11.8	35.9	0.272	0.493	61.752	0.818
	Simulação	56.2				0.212	0.426	42.549	0.569
NELAS	Realidade	15.3	91.8	103.7	8.2	0.336	0.469	43.824	0.889
	Simulação	29.9				0.570	0.649	74.924	0.862
FAGILDE	Realidade	6.4	92.2	264.7	7.8	0.282	0.447	49.387	0.748
	Simulação	22.8				0.582	0.713	97.093	0.880
CUJÓ	Realidade	34.0	59.0	61.8	41.0	0.257	0.456	40.788	0.804
	Simulação	41.1				0.324	0.544	63.822	0.733
SOBRAL	Realidade	11.3	93.9	80.1	6.1	0.559	0.690	82.818	0.945
	Simulação	19.7				0.595	0.795	89.318	0.783
POÇO SANTIAGO	Realidade	10.1	90.1	80.7	9.9	0.494	0.710	78.353	0.889
	Simulação	17.2				0.479	0.602	113.798	0.792
ENCOSTAS de SÁ	Realidade	245.6	5.4	24.2	94.6	0.313	0.617	97.442	0.482
	Simulação 1	72.6				0.322	0.612	88.203	0.504
	Simulação 2	345.9				0.504	0.675	100.060	0.646
MORTI-NHOS	Realidade	8.3	91.7	75.8	8.3	0.230	0.479	61.319	0.675
	Simulação	13.8				0.317	0.515	56.460	0.456
QUINTA da MÁQUINA	Realidade	180.8	91.1	90.4	8.9	0.543	0.694	78.682	0.945
	Simulação	189.4				0.462	0.654	64.254	0.864
PINOUCA	Realidade	31.9	85.1	48.2	14.9	0.441	0.658	79.482	0.824
	Simulação	42.5				0.623	0.740	95.027	0.939



**Figura 3:** Ilustração dos testes efectuados entre os 15 incêndios seleccionados e as respectivas simulações.

Quanto aos resultados gerais de comparação das formas finais (ver Tabela 3), podemos afirmar, que para os 11 fogos que atingiram o 4º nível de fiabilidade, os índices apresentam valores semelhantes. Parece-nos também que a avaliação do grau de semelhança das formas através de índices de forma é limitada devido à existência de situações como a do fogo do Nesperido. Neste fogo, apesar de a simulação ser uma das que melhor reproduz as sequências de percursos reais, com inversões complexas de direcção de propagação que são correctamente reproduzidas na simulação, e de as formas reais e simulada serem muito parecidas, os índices de forma apresentam valores muito diferentes devido à grande anisotropia da forma do fogo real.

Dos quatro casos que não atingem o 4º nível de fiabilidade, dois correspondem a simulações totalmente diferentes do fogo real (Encostas de Sá e Srª da Ouvida), outra corresponde a uma simulação com direcções de propagação mais ou menos aproximadas das reais mas com erros substanciais por omissão (Cujó), e o último corresponde ao fogo de Fagilde o qual foi fortemente combatido num flanco que se propaga rapidamente na simulação; nos outros flancos há uma aderência boa entre a simulação e a realidade.

A análise dos dois casos em que não há qualquer aderência entre a simulação e a realidade fornece pistas importantes. É de realçar que em ambos os casos, tal como no caso do fogo de Cujó, o fogo real se propagou numa só encosta com exposições consistentemente opostas à direcção predominante do vento. De facto, tal como já foi referido, o modelo de ventos utilizado correntemente no programa *Geofogo* não reproduz correctamente fenómenos como o efeito de *eddies* (Pyne *et al.* 1986), efeito este que pode inverter o sentido geral do vento e ocorre em encostas com exposição oposta a este. Assim, os ventos ao nível do terreno, que são os que condicionam a propagação de fogos florestais, podem passar a subir a encosta empurrando as frentes de chamas no sentido oposto ao dos ventos medidos a maior altura. Este problema é mais importante nos casos em que não há medições meteorológicas no local do fogo. Três dos casos em que não há aderência entre as simulações e a realidade estão nas condições acima referidas; isto é, correspondem a eventos que não têm medições meteorológicas no local e ocorrem em áreas de exposição oposta à dos ventos predominantes registados na estação sinóptica de Viseu. Para ilustrar como a falha na reprodução dos efeitos provocados pela interacção do vento com a topografia pode estar na base de erros de simulação, mostramos o resultado da simulação realizada com inversão da direcção dos ventos para o caso do fogo de Encostas de Sá na figura 3 (12a) e na tabela 3.

Com o objectivo de testar se, entre as médias das duas amostras (fogos reais e fogos simulados), as áreas ardidadas e índices de forma apresentam diferenças significativas, realizaram-se testes de T. Relativamente às áreas ardidadas e aos índices de forma orientação e alongamento (mesmo mantendo os fogos em que não há nenhuma aderência entre a simulação e a realidade), os testes efectuados permitem aceitar a hipótese de que as duas amostras não são significativamente diferentes.

## Avanço do estado dos conhecimentos

Os avanços conseguidos com a realização deste projecto estão sobretudo relacionados com dois aspectos: (1) a operacionalidade e realismo e (2) o teste e avaliação das condições sob as quais os modelos podem ser utilizados. Em ambos os aspectos foram conseguidos avanços importantes e que passamos a discutir.

Apesar de há vários anos se desenvolverem trabalhos que procuram espacializar em SIG os modelos que foram utilizados no projecto *Geofogo* para realização de simulações (Vasconcelos and Pereira, 1990; Ball and Guertin, 1992; Vasconcelos and Guertin, 1992) todos os que conhecemos têm como forma de representação da evolução da situação no tempo, a disponibilização de retratos do estado do sistema simulado em instantes preestabelecidos. Desta forma, o acesso às características espaciais do processo em simulação é retalhado no tempo, e requer permanentes transferências de grandes volumes de dados entre diferentes aplicações com a realização de cálculos extensivos a toda a área da base de dados sob análise, tornando o processo de simulação demasiado pesado para fins operacionais. A utilização de SIG é feita apenas como forma de armazenar dados geográficos e de mostrar em determinados instantes os resultados da aplicação dos modelos teóricos programados e executados externamente. Tal aproximação resulta em dificuldades de utilização operacional dos sistemas de previsão.

O *Geofogo* constitui um avanço substancial sobre este panorama pois foi concebido de raiz como um sistema de informação geográfica temporal. Isto é, um sistema onde todos os dados geográficos e alfanuméricos têm como um dos seus atributos o tempo, o qual varia e faz variar os outros atributos de acordo com o evoluir da situação simulada. A sincronização da passagem do tempo entre todas as peças activas é controlada e garantida por um elemento especial do modelo que inclui como parte fundamental um relógio. Todos os objectos deste sistema espacio-temporal funcionam como peças geo-referenciadas que podem evoluir numa base de tempo contínua e com estados mostrados aos utilizadores continuamente. Assim, e uma vez que se trata de uma aproximação baseada em modelos hierárquicos, modulares e orientados por objectos, o programa está preparado para simular qualquer fenómeno espacio-temporal para o qual existam modelos teóricos apropriados e dados disponíveis, mostrando continuamente, e de forma dinâmica, o evoluir do processo .

O desenvolvimento do *Geofogo* da forma acima mencionada permite ainda uma outra inovação não menos importante. A possibilidade de realizar em computadores portáteis simulações pesadas, que recorrem a bases de dados volumosas e complexas, e que requerem emulação do processamento paralelo hoje disponível nos supercomputadores. De facto, muitos dos outros sistemas que conhecemos não apresentam o nível de realismo possível com o *Geofogo* e funcionam em estações de trabalho Unix, não disponíveis para o público em geral, requerendo como utilizadores técnicos especializados. Embora o nível de operacionalidade possível com o *Geofogo* esteja ainda condicionado pela disponibilidade de dados geo-referenciados em formatos utilizáveis, a sua operação por parte de qualquer técnico superior familiarizado com o sistema *Windows* não necessita de mais do que uma sessão de aprendizagem.

Não conhecemos nenhum outro trabalho onde se tenha testado a fiabilidade dos sistemas de simulação de fogos apresentados de forma comparável à realizada neste projecto. De

facto, a dificuldade de obtenção dos dados necessários sobre incêndios reais é considerável, tornando o trabalho de teste e validação das simulações dispendioso.

## CONCLUSÕES

Os testes realizados, por comparação da progressão de fogos reais com fogos simulados nas mesmas condições, permitem concluir que o simulador prevê, na grande maioria dos casos, progressões do fogo que correspondem às realmente ocorridas. Convém manter em mente que com os modelos de simulação desenvolvidos procurámos reproduzir um fenómeno extremamente complexo; de facto, a progressão de fogos florestais é controlada pela interacção de um enorme conjunto de variáveis difíceis de quantificar e de representar no espaço, pelo que seria irrealista esperar uma reprodução exacta do comportamento real do fogo. No entanto, isto não invalida que a construção de novos modelos de propagação de fogos florestais possa contribuir de forma importante para um melhor conhecimento do fenómeno e para o aumento da capacidade preditiva. É importante realçar que o programa *Geofogo* está desenhado de forma a poder utilizar novos modelos que venham a estar disponíveis e introduzir novos tipos de modelos de combustível parametrizados de forma diferente.

Com a realização deste projecto procura-se desenvolver um instrumento de suporte à decisão para dar apoio a trabalhos de planeamento florestal; de cartografia e gestão do perigo de incêndio; de formação sobre o comportamento de fogos florestais e sobre sistemas de informação geográfica; de especialização de técnicos para apoio à decisão estratégica durante grandes incêndios; e de sensibilização para a utilidade de bases de dados geográficas *on-line* através da Internet.

O simulador de fogos florestais que nos propusemos desenvolver está pronto a ser utilizado em computadores pessoais, estando definidas as condições sob as quais pode contribuir no apoio à decisão. O *software Geofogo*, bem como informações adicionais sobre o projecto, encontram-se disponíveis na seguinte morada na Internet: <http://geofogo.cnig.pt>.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os colaboradores do projecto a forma empenhada com que se envolveram nos trabalhos de campo, e em especial aos Eng.s Patrícia Vinagre e Tiago Oliveira. Realçamos ainda a importante contribuição dada pelo responsável de acompanhamento do projecto Eng. Rui Silva da Estação Florestal Nacional. Agradecemos também a colaboração prestada pelas seguintes instituições: Direcção Regional de Agricultura da Beira Litoral (Zona Agrária de Dão e Lafões, e Direcção de Serviços das Florestas); Centro de Coordenação Operacional dos Bombeiros Voluntários de Viseu (CCO Viseu); Centro de Prevenção e Detecção de Incêndios Florestais (CPD03); Inspecção Regional dos Bombeiros Voluntários da Região Centro e Instituto de Meteorologia.



## Referências

- Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, GTR, INT-122.
- Andrews, P.L. (1986). Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system – BURN subsystem, part1. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, GTR, INT-194.
- Ball, G. and Guertin, P. (1992). Improved fire growth modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 2 (2), pp: 47-54.
- Coleman, J. R. and A. L. Sullivan (1996). A real-time computer application for the prediction of fire spread across the Australian Landscape. *Simulation*, 67 (4), pp: 230-240.
- D.G.F. (1997). Relatório Final - Incêndios Florestais. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas - Direcção Geral das Florestas - Direcção de Serviços de Valorização do Património Florestal - Divisão de Protecção e Conservação Florestal.
- Feunekes, H. (1991). Error analysis in fire simulation models. Master Thesis. University of Brunswick.
- ICONA (sem data). Clave fotografica para la identificacion de modelos de combustible. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion.
- Pyne, Stephen J.; Patricia L Andrews and Richard D. Laven (1986). *Introduction to wildland fire*. John Wiley and Sons.
- Rothermel, R.C.; R.A. Wilson; G.A. Morris e S.A. Sackett (1986). Modelling moisture content of fine dead wildland fuels: input to BEHAVE fire prediction system. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Research Paper, INT-359.
- Rothermel, R.C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, GTR, INT-143.
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper, INT-115.
- Salazar, L.A. and K.E. Palmer (1987). Spatial analysis of fire behavior for fuel management decision making. GIS 87, October 1987, San Francisco, California, USA.
- Vasconcelos, M. J. and D.P. Guertin (1992). FIREMAP - simulation of fire growth with a geographic information system. *International Journal of Wildland Fire*, 2, pp: 87-96.
- Vasconcelos, Maria J. Perestrello; José M. C. Pereira and Bernard P. Zeigler (1995). Simulation of fire growth using discrete event hierarchical modular models, *EARSel Advances in Remote Sensing*, 4 (3), pp: 54-62.
- Zeigler, B.P. (1976). *Theory of modeling and simulation*, J. Wiley & Sons, New York.
- Zeigler, B.P. (1990). *Object-oriented simulation with hierarchical, modular models*. Academic Press, Boston.