

## **Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores Parte II: Modelos Globais e Sistemas Informáticos**

**Jorge C. S. André\*, Domingos X. Viegas\*\***

\*Professor Auxiliar

\*\*Professor Catedrático

Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Mecânica, Pinhal de  
Marrocos, 3030 COIMBRA

**Sumário.** Este artigo, que pela sua extensão foi subdividido em duas partes, dirige-se prioritariamente a utilizadores de modelos de propagação de fogos florestais. Visa proporcionar-lhes uma visão panorâmica actualizada do estado dos conhecimentos nesta área, propondo uma classificação geral para os modelos existentes e expondo, em termos simples, para alguns modelos ilustrativos de cada classe: os princípios físicos e a estratégia de modelação que lhes estão subjacentes; os seus parâmetros de entrada e saída; as suas limitações de aplicação, a fiabilidade das suas previsões e as suas perspectivas de desenvolvimento futuro. Na parte II do artigo, apresentam-se os modelos que fazem previsões para toda a linha da frente, divididos em físicos incompletos e completos. Finalmente, abordam-se os sistemas informáticos implementando alguns dos modelos de propagação existentes. (A Parte I do artigo, está publicada em ANDRÉ e VIEGAS, 2001).

**Palavras-chave:** modelos semi-empíricos; modelos físicos; modelos globais; sistemas informáticos

**Abstract.** This paper, which was subdivided into two parts because of its length, is aimed at users of forest fire propagation models. Our purpose is to provide an overall view of the state-of-the-art of the subject; we propose a general classification for the existing models and describe, in simple terms, typical models in each class: the underlying physical principles and modelling strategy; the input and output parameters; the limits of application, the reliability of the predictions and the perspectives for future development. In this Part II of the paper, the models that predict the behaviour of the whole fire front are presented, divided, respectively, into physical incomplete and complete models. Finally, the software systems implementing some of the existing fire propagation models are reviewed. (The Part I of the paper, was published in ANDRÉ e VIEGAS, 2001).

**Key words:** semi-empirical models; physical models; global models; software systems

**Résumé.** Cet article, qui a été sous divisé en deux parties à cause de son extension, est dirigé prioritairement aux utilisateurs des modèles de propagations de feux de forêts. Il s'agit de leurs procurer une vision panoramique de l'état présent des connaissances dans ce domaine, en proposant une classification générale pour les modèles existants, et en présentant, en termes simples, pour quelques modèles illustratifs de chaque classe, les principes physiques et la

stratégie de modélisation sur lesquelles ils se basent; les paramètres d'entrée et de sortie; les limites d'application, la fiabilité de prédiction et les perspectives de développement futur. Dans cette Partie II de l'article, on présente les modèles qui font des prévisions pour tout le front du feu, sous divisés en modèles physiques incomplets et complets. Finalement, on introduit les systèmes informatiques qui abordent quelques modèles de propagation existants. (La Partie I de l'article, est publié dans ANDRÉ e VIEGAS, 2001).

**Mots-clés:** modèles semi-empiriques; modèles physiques; modèles globaux; systèmes informatiques

### **Modelos de previsão do comportamento da frente de fogo completa**

O cenário de modelação contemplado na parte II deste artigo generaliza o da parte I em duas direcções. Por um lado, ainda num âmbito espaço-temporal de descrição relativamente restrito (âmbito local), deixam de existir limitações impostas às direcções relativas de declive máximo (vector  $h$ ), da velocidade do vento (vector  $U$ ), e da normal à frente (vector unitário  $n$ ). E, por outro lado, passa agora a adoptar-se um âmbito de descrição muito mais amplo no espaço e no tempo (âmbito global), abarcando uma parte extensa da linha da frente de fogo, no qual, geralmente, as condições do leito e do ambiente não são nem uniformes nem constantes. Daí que também se designem estes modelos por modelos com carácter global.

#### *Modelos físicos semi-empíricos e incompletos*

Estes modelos caracterizam-se por empregarem algumas hipóteses físicas simplificativas e por incorporarem partes empíricas, não se baseando pois, exclusivamente, em leis físicas fundamentais. Daqui decorrem restrições de aplicação mais ou menos importantes. Depois de apresentarmos a teoria unificadora de ANDRÉ e VIEGAS (1998b), que integra um conjunto relativamente numeroso e diversificado de modelos, expomos uma proposta crítica

construtiva à teoria anterior, da autoria de VIEGAS *et al.*.

#### Modelos baseados no princípio de desagregação

A teoria de ANDRÉ e VIEGAS (1998b), de que passamos a expor as linhas gerais, proporciona um enquadramento integrador a um conjunto de modelos desenvolvidos ao longo de um arco de investigação que remonta ao princípio dos anos 70 e se prolonga até ao presente. O *leit-motiv* da teoria consiste na observação/conjectura de que, em certos fogos florestais, o comportamento de uma pequena secção da frente é essencialmente determinado pelas condições do leito e do ambiente numa vizinhança suficientemente restrita para que, no seu interior, aquelas condições se possam considerar aproximadamente homogéneas e constantes durante um curto intervalo de tempo (em termos estatísticos médios). A teoria traduz este *leit-motiv* em termos físicos e matemáticos rigorosos, no chamado Princípio de Desagregação.

Para formular este Princípio, introduz-se o conceito primitivo de observador. Com efeito, para descrever o campo de um parâmetro de entrada qualquer –como seja, a porosidade do leito combustível ou a velocidade do vento– é necessário estabelecer previamente um observador, pela adopção de escalas espaciais e temporais

de resolução ( $\lambda$ ,  $\tau$ ) e de amplitude ( $L$ ,  $T$ ), e pela escolha de um posto de observação sobre o terreno. Naturalmente, por trás da escala de resolução espacial  $\lambda$  (temporal,  $\tau$ ), está um operador de média apropriado, que filtra da descrição todas as irregularidades do campo caracterizadas por um extensão (duração) mais pequena que  $\lambda$  ( $\tau$ ). Em particular, um observador global tem parâmetros de escala ( $\lambda_2$ ,  $\tau_2$ ,  $L_2 \sim$  (perímetro da linha da frente de fogo),  $T_2 \sim$  (duração de descrição desejada)), filtrando o campo de qualquer parâmetro de entrada com um operador de média móvel. Assim, o campo resultante, designado por campo global do parâmetro, tem variações no espaço e no tempo tanto mais suaves em relação às do campo real, quanto maiores forem as escalas ( $\lambda_2$ ,  $\tau_2$ ), as quais, em todo o caso, são sempre muito inferiores às escalas de amplitude ( $L_2$ ,  $T_2$ ). Em contrapartida, um observador local caracteriza-se por ter parâmetros de escala ( $\lambda_1$ ,  $\tau_1$ ,  $L_1 = \lambda_1$ ,  $T_1 = \tau_1$ ), e um posto de observação localizado num certo ponto do espaço-tempo ( $P$ ,  $t$ ). Chama-se vizinhança local de ( $P$ ,  $t$ ),  $V(P, t)$ , a uma vizinhança espaço-temporal do ponto ( $P, t$ ) com diâmetro  $\lambda_1$  e duração  $\tau_1$ . Por conseguinte, o âmbito de descrição deste observador restringe-se à sua vizinhança local, na qual todos os campos de parâmetros de entrada são descritos homogênea e estacionariamente, pelos seus respectivos valores médios em  $V(P, t)$ , também chamados valores locais.

Posto isto, de acordo com o Princípio de Desagregação, o problema da descrição do movimento da linha da frente de fogo, por um observador global particular, com escalas de resolução ( $\lambda_2$ ,

$\tau_2$ ), é dividido num par de sub-problemas designados, respectivamente, problema global e problema local.

O problema global põe-se directamente ao observador global. Este observador vê a frente como uma linha movendo-se continuamente sobre o plano horizontal de referência. Designemos esta linha, no instante de tempo genérico  $t$ , por  $\Phi(t)$ . O problema global, formulado para um intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$ , sendo  $\Delta t$  uma duração pequena mas arbitrária, consiste, então, em obter a linha  $\Phi(t + \Delta t)$ , a partir da linha  $\Phi(t)$  e dos campos globais de todos os parâmetros de entrada relevantes, durante  $[t, t + \Delta t]$ . Esta formulação é dita uma formulação diferencial (quando a duração  $\Delta t$  se torna infinitesimal) explícita no tempo, mas é evidente que a passagem para a correspondente formulação integral, em que o pequeno intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$  é substituído por um outro com duração tão grande quanto se queira, não encerra nenhuma dificuldade particular. Assim, este problema é resolvido por um Modelo Global de Propagação da Frente (MGPF), que admite sempre uma formulação canónica (diferencial explícita no tempo) constando dos três passos seguintes. Primeiro passo: subdivisão da linha  $\Phi(t)$  numa partição de secções elementares contíguas - a  $i$  <sup>ésima</sup> secção, designada por  $\delta_i \Phi(t)$ , tem comprimento  $\Delta s_i$  e ponto central  $P_i$ , que podem ser de ordem zero (isto é, independentemente de  $\Delta s_i$ , apenas interessa o ponto central de  $\delta_i \Phi(t)$ ,  $P_i$ ), de ordem um (a secção é assimilada a um segmento de recta tangente a  $\Phi(t)$ , em  $P_i$ ) ou de ordem dois (a secção é assimilada a um arco de circunferência osculador a

$\Phi(t)$ , em  $P_i$ ). O comprimento característico da partição é  $\Delta s = \max \{\Delta s_i, i = 1, \dots, n\}$ . Segundo passo: resolução de um certo problema local, definido abaixo, para cada uma das secções  $\delta_i \Phi(t)$ . Terceiro passo: integração e harmonização de toda a informação local obtida no segundo passo, por emprego de um certo princípio de acoplamento, daqui resultando uma solução aproximada para a forma e posição da linha  $\Phi(t + \Delta t)$ , que depende da grandeza dos parâmetros  $(\Delta s, \Delta t)$  e do esquema de subdivisão da frente adoptado no primeiro passo. Naturalmente, a solução matemática exacta do problema global proporcionada pelo MGPF em causa, é obtida no caso-limite em que  $(\Delta s, \Delta t)$  se tornam infinitesimais, sendo independente do processo de subdivisão da frente. Em resumo, na teoria, independentemente da formulação usada (explícita ou implícita no tempo; diferencial ou integral, no espaço e/ou no tempo), um MGPF fica completamente caracterizado dando, conjuntamente: a ordem das secções elementares em que subdivide a frente (primeiro passo); o problema local que coloca (segundo passo); e o princípio de acoplamento que adopta (terceiro passo).

O problema local respeitante à secção elementar  $\delta_i \Phi(t)$ , posto por um dado MGPF, é dirigido ao observador local situado em  $(P_i, t)$ , com escalas de resolução coincidentes com as do observador global, isto é  $(\lambda_1 = \lambda_2, \tau_1 = \tau_2)$ . Com toda a generalidade, pode dizer-se que a solução deste problema está directamente relacionada com a propagação de uma certa frente virtual  $\Phi_{v,i}$  no interior da vizinhança local  $V(P_i, t)$ , durante um intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t']$ , em que  $\Delta t' \leq \Delta t$ . Para obter esta

solução, supõem-se conhecidos: a forma e posição iniciais da frente virtual, que é  $\Phi_{v,i}(t) \equiv \delta_i \Phi(t)$ ; e os valores locais de todos os parâmetros de entrada (imperturbados) relevantes, respeitantes ao leito e ao ambiente em  $V(P_i, t)$ . Além disso, no cálculo do movimento de  $\Phi_{v,i}$  assumem-se duas hipóteses simplificativas, a saber: desprezam-se efeitos de bordo, devidos à extensão finita de  $\Phi_{v,i}$ ; e admite-se que a propagação é quasi-estacionária, isto é, que, instantaneamente, a frente está em equilíbrio. Posto nestes termos, é intuitivo que o problema local se constitui como sendo um problema físico autónomo, que pode, portanto, ser resolvido independentemente do problema global. Na teoria, designa-se por Modelo Local de Propagação (MLP) qualquer modelo que seja capaz de resolver, melhor ou pior, um dado problema local.

Deste modo, uma vez que um MGPF formule o seu problema local, as tarefas de construção e validação do MGPF propriamente dito, e de um MLP associado, tornam-se completamente independentes, sendo abordadas em duas partes distintas da teoria, cujo estado actual de desenvolvimento passamos a descrever.

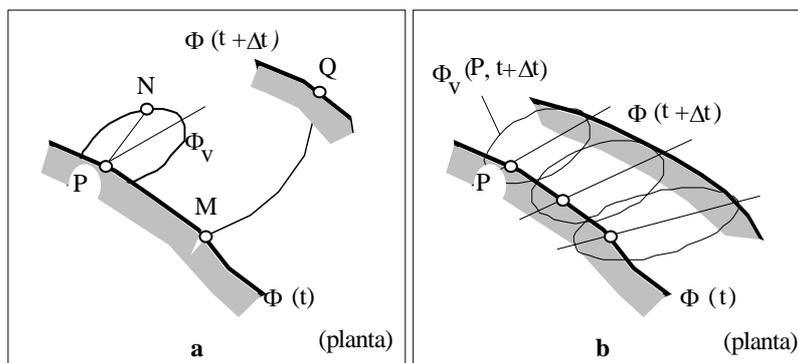
Quanto à parte da teoria que trata dos MGPF, tudo indica que, do ponto de vista físico e analítico, ela se encontra já completamente esclarecida e elaborada (ANDRÉ e VIEGAS, 1998b), ficando apenas por refinar e aprofundar alguns aspectos numéricos. Resumidamente, concluiu-se que a teoria admite essencialmente três MGPF distintos, um dos quais possui duas variantes, que são aqui designados, respectivamente, por: MGPF 1, MGPF 2, MGPF 3r (versão restrita) e MGPF 3 (versão geral).

Seguem-se as suas formulações físicas canónicas.

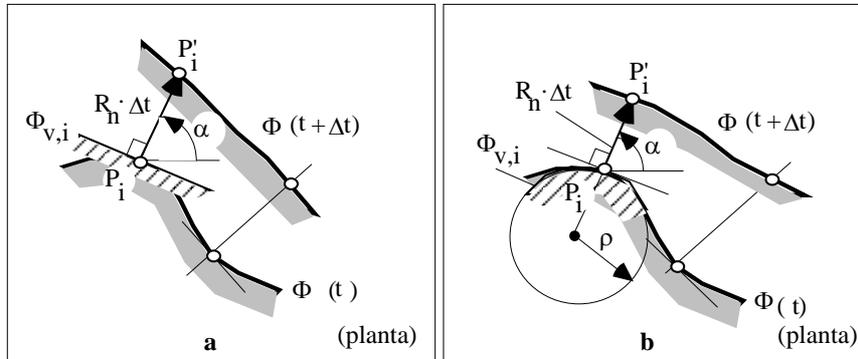
O modelo MGPF 1 (Figura 1a) usa secções elementares da frente de ordem zero. O problema local (formulação diferencial implícita no tempo) posto por este modelo para a secção  $\delta\Phi(t)$ , centrada no ponto  $P$ , consiste em calcular o tempo  $\Delta t(P, N)$ , que a frente virtual fechada  $\Phi_v$ , tal que  $\Phi_v(t) \equiv P$  -isto é, resultante de uma ignição pontual em  $P$ , no instante  $t$ -, demora a atingir um ponto  $N$  pré-definido, situado dentro da vizinhança local de  $P$ ,  $V(P, t)$ . Na terminologia deste modelo diz-se que  $\Delta t(P, N)$  está associado a um trajecto directo da frente, de  $P$  para  $N$ . Finalmente, o princípio de acoplamento adoptado por este modelo (formulação integral implícita no tempo) é equivalente a considerar que a frente  $\Phi(t)$  chega a um ponto  $Q$  arbitrário, da parte do leito ainda não queimada no instante  $t$ , seguindo a sucessão de trajectos (elementares) directos mais rápida. Prova-se em ANDRÉ e VIEGAS (1998a) que este modelo pode receber uma formulação numérica bastante simples e eficiente -a qual, desde KOURTIZ e O'REGAN (1971), se tornou

muito popular-, baseada num algoritmo proposto originalmente por Dijkstra no âmbito da Teoria dos Grafos. Na verdade, até à data, apenas esta formulação numérica do modelo MGPF 1 tem sido implementada, para além dos autores já mencionados, por FRANDSEN e ANDREWS (1979), VASCONCELOS (1988), FEUNEKES (1991), BARROS e BALL (1998), e outros.

O modelo MGPF 2 (Figura 1b) usa, tal como o MGPF 1, secções elementares de ordem zero. O seu problema local (formulação diferencial explícita no tempo) envolve o mesmo tipo de frentes virtuais  $\Phi_v$  que o MGPF 1, mas, desta vez, consiste na especificação da forma e posição de  $\Phi_v(t + \Delta t)$ , sendo  $\Delta t$  o passo de tempo utilizado no problema global. O princípio de acoplamento é análogo ao princípio de Huygens da Óptica, e consiste em postular que a linha da frente  $\Phi(t + \Delta t)$  é a linha envolvente da família de frentes virtuais  $\{\Phi_{v,i}(t + \Delta t), i = 1, \dots, n\}$ , tirada do lado do leito ainda não queimado em  $t$ . Eis alguns dos trabalhos em que se investiga este modelo: VAN WAGNER (1969), ANDERSON *et al.* (1982), RICHARDS (1990) e MARGERIT e SERO-GUILLAUME (1998).



**Figura 1** - Ilustração do problema local e do princípio de acoplamento do: (a) MGPF 1, (b) MGPF 2



**Figura 2** - Problema local e princípio de acoplamento do: (a) MGPF 3r, (b) MGPF 3

O modelo MGPF 3r (ver Figura 2a) subdivide a frente em secções de ordem um. O problema local (formulação diferencial explícita no tempo) que coloca para a secção  $\delta_1\Phi(t)$ , centrada no ponto  $P_i$ , consiste, essencialmente, na determinação da velocidade normal de propagação  $R_n$ , de uma frente virtual  $\Phi_{v,i}$  rectilínea, infinita e estacionária, orientada paralelamente à recta tangente a  $\Phi(t)$  em  $P_i$ , em função das condições do leito e ambientais da vizinhança local  $V(P_i, t)$ . O princípio de acoplamento que postula corresponde a assumir que a frente  $\Phi(t + \Delta t)$  passa pelos pontos  $\{P'_i, i = 1, \dots, n\}$ , encontrando-se o ponto  $P'_i$ , na intersecção da frente virtual  $\Phi_{v,i}(t + \Delta t)$ , com a recta que lhe é perpendicular e passa por  $P_i$ . Este modelo é estudado por CATCHPOLE *et al.* (1982), ROBERTS (1989) e RICHARDS (1995), entre outros. Por último, o modelo MGPF 3 (ver Figura 2b) constitui a generalização directa do MGPF 3r para secções elementares da frente de ordem dois, considerando que a velocidade de propagação  $R_n$  da frente virtual  $\Phi_{v,i}$  não depende só das condições locais do leito e do ambiente

em  $V(P_i, t)$ , e do ângulo de orientação  $\alpha$ , da recta tangente a  $\Phi(t)$  em  $P_i$ , mas também do raio de curvatura  $\rho$ , da linha  $\Phi(t)$  em  $P_i$ . Este modelo parece ter sido antevisto por ROBERTS (1989), sendo estudado também por ANDRÉ (1996).

Para terminar o resumo desta parte da teoria, referimos que, como resultado do estudo analítico comparativo dos MGPF anteriores (ANDRÉ e VIEGAS, 1998b), se concluiu que: o MGPF 3 é o único que tem a mesma generalidade de aplicação que a teoria; os restantes modelos não se podem aplicar quando exista um efeito local de curvatura da linha da frente  $\Phi(t)$ , significativo; e, finalmente, no seu âmbito comum de aplicação, todos os modelos proporcionam a mesma solução exacta para o movimento da linha da frente  $\Phi$  (obviamente, desde que se empreguem MLP equivalentes).

Passando agora à parte da teoria que lida com a construção de um MLP adequado às necessidades de previsão, pode dizer-se que a teoria deixa essencialmente em aberto a resolução deste problema, admitindo, nomeadamente, o recurso aos modelos já

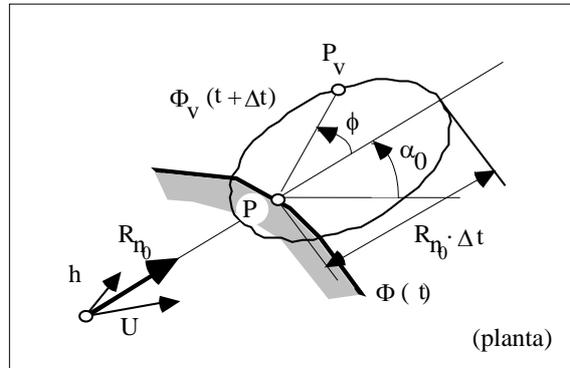
apresentados. Por outro lado, é o MLP que determina o conjunto de parâmetros de entrada do leito e do ambiente, do problema global. Infelizmente, de momento, os modelos disponíveis não satisfazem plenamente as necessidades, obrigando ao uso de hipóteses físicas simplificativas e de correlações empíricas adicionais, com carácter mais ou menos *ad-hoc*.

Com efeito, suponhamos, por exemplo, que se pretendia construir um MLP capaz de resolver o problema local formulado pelo MGPF 2. Neste caso, para começar, pode invocar-se um resultado geral da teoria (ANDRÉ, 1996), segundo o qual a distância do ponto genérico  $P_v$  da frente virtual  $\Phi_v(t + \Delta t)$ , identificado pelo ângulo polar  $(\Phi + \alpha_0)$ , ao ponto de ignição  $P$  (ver Figura 3), é dada por

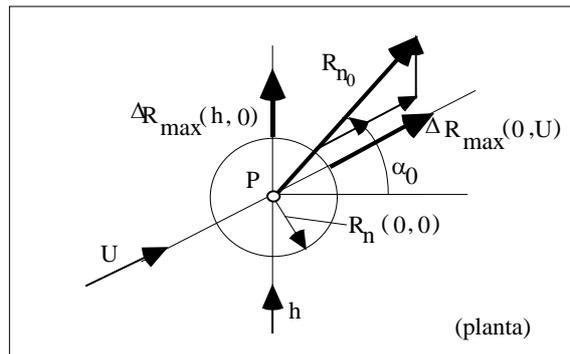
$$\overline{PP_v} = (R_{n_0} \cdot \Delta t) \cdot F(\Phi), \quad (1)$$

em que:  $R_{n_0}$  é a velocidade de propagação da frente rectilínea, infinita e estacionária, que se propaga à máxima velocidade nas condições locais reinantes em  $V(P, t)$ , a qual tem orientação perpendicular à direcção para a secção elementar  $\delta\Phi(t)$ , centrada em  $P$ . O ambiente na vizinhança local  $V(P, t)$ , caracteriza-se pelos vectores de velocidade do vento  $U$ , e de gradiente topográfico  $h$ , é identificada pelo ângulo polar  $\alpha_0$ ; e a função  $F(\Phi)$ , que toma valores entre 0 e 1, sendo  $F(0^\circ) = 1$ , é chamada a função de forma normalizada da frente virtual  $\phi_v$ . Por conseguinte, nesta formulação, o MLP deve determinar o vector  $R_{n_0}(R_{n_0}, \alpha_0)$  e a função  $F$ , com base nas condições locais do leito e do ambiente na vizinhança  $V(P, t)$ . Para ilustrar a hipótese que nos interessa, vamos cingir-nos à determinação do vector velocidade de propagação

$R_{n_0}$ , em grandeza ( $R_{n_0}$ ) e direcção ( $\alpha_0$ ). Se apenas dispusessemos de um modelo de propagação com o âmbito de aplicação que se descreve na introdução da segunda secção da Parte I do artigo, que só permite determinar a velocidade de propagação  $R_{n_0}$  de uma frente rectilínea, infinita e estacionária, orientada perpendicularmente à direcção comum do vento ( $U$ ) e do gradiente topográfico ( $h$ ), é evidente que não seríamos capazes de resolver o problema pedido. É neste contexto que se torna necessário recorrer a uma hipótese física adicional, como a de ROTHERMEL (1983), que ilustramos na Figura 4, onde se emprega a seguinte nomenclatura:  $R_n(0, 0)$  é a velocidade de propagação de uma frente rectilínea, infinita e estacionária, através do leito característico de  $V(P, t)$ , quando não há declive nem vento (naturalmente, neste caso, a orientação da frente não importa pois não altera a velocidade de propagação);  $\Delta R_{\max}(h, 0)$  é o incremento vectorial (isto é, em grandeza e direcção) sofrido pela velocidade de propagação da frente rectilínea que se propaga à máxima velocidade, relativamente ao caso sem declive nem vento, em virtude do terreno passar a ter inclinação  $h$  (como é óbvio, a frente a que nos estamos aqui a referir é perpendicular à direcção de  $h$ ); e  $\Delta R_{\max}(0, U)$  é o incremento vectorial sofrido pela velocidade de propagação da frente rectilínea que se propaga à máxima velocidade, relativamente ao caso sem declive nem vento, causado pelo aparecimento de um vento com velocidade  $U$  (é evidente que a frente aqui implicada é normal à direcção de  $U$ ). De passagem, referimos que, tanto quanto sabemos, esta hipótese não foi submetida a nenhum teste experimental directo, apesar de ser muito usada.



**Figura 3** - Frente virtual  $\Phi_v(t + \Delta t)$ , solução do problema local posto pelo MGPF 2, para a secção elementar  $\delta\Phi(t)$ , centrada em P. O ambiente na vizinhança local  $V(P, t)$ , caracteriza-se pelos vectores de velocidade do vento  $U$ , e de gradiente topográfico  $h$



**Figura 4** - Hipótese de ROTHERMEL (1983), para determinar o vector  $R_{n_0}(R_{n_0}, \alpha_0)$ , no caso em que a velocidade do vento (vector  $U$ ) não está alinhada com a direcção de declive máximo do terreno (vector  $h$ )

Para encerrar a exposição da teoria, é importante mencionar as suas limitações de aplicação. Com efeito, o Princípio de Desagregação, em que esta se apoia, requer que cada secção elementar da frente de fogo se propague em condições de quasi-equilíbrio local. Ora, há fogos florestais que, manifestamente, não satisfazem esta condição, pelo menos nalgumas partes da sua frente. Além disso, mesmo quando isto não ocorre, dependendo da heterogeneidade e

variabilidade dos campos de parâmetros de entrada característicos do leito e do ambiente, o Princípio de Desagregação também pode não ser aplicável para valores muito pequenos das escalas de resolução  $(\lambda_2, \tau_2)$ , do observador global. Como é evidente que a descrição da frente proporcionada pela teoria é tanto mais detalhada quanto mais reduzidas forem estas escalas, está aqui implicada a (eventual) existência de um limite fundamental de resolução de descrição

da teoria. Resumindo, do ponto de vista prático, embora não existam ainda critérios bem definidos e fáceis de verificar sobre as condições de aplicabilidade da teoria, é de supor que ela descreve com resolução satisfatória, a propagação de uma frente plenamente desenvolvida, de fogo florestal de superfície de baixa ou média intensidade, desde que a vegetação, a topografia do terreno e o vento variem de forma relativamente suave no espaço e no tempo.

#### Proposta Crítica de Viegas *et al.*

A proposta de VIEGAS *et al.* (1998), sob certo aspecto, pode ser vista como uma crítica construtiva à teoria exposta acima. Com efeito, considere-se uma frente rectilínea e infinita -isto é, negligenciando efeitos de bordo-, propagando-se através de um leito estatisticamente homogéneo, em terreno plano e sob vento uniforme e constante. Pois bem, estes autores sustentam que, desde que a direcção normal à frente ( $n$ ) faça inicialmente um ângulo  $\beta$ , não nulo (em particular dentro do intervalo  $10^\circ < \beta < 80^\circ$ ), com a direcção de declive máximo do terreno ( $h$ ), ou da velocidade do vento ( $U$ ), a frente adquire um movimento composto de translação e rotação, contrariamente ao movimento de translação simples previsto pela teoria de ANDRÉ e VIEGAS (1998b).

Em consequência, num esforço construtivo para chegar a um quadro teórico de modelação mais geral que o anterior, estes autores encetaram um programa experimental com o propósito de obter, por via empírica, uma lei de dependência da velocidade angular de rotação intrínseca (isto é, independente da componente de translação) instan-

tânea da frente, quantificada pela taxa  $w = (d\beta/dt)$  [ $^\circ/s$ ], em função: da orientação instantânea da frente,  $\beta$ ; do declive máximo do terreno; da velocidade do vento; e das características do leito. Resultados preliminares sugerem que a velocidade angular modificada  $w' [^\circ/m] = w/R_0$ , sendo  $R_0$  a velocidade de propagação da frente no leito, em terreno horizontal e sem vento, é bastante mais independente das propriedades do leito que  $w$ . Por outro lado, até à data, estes autores apenas estudaram separadamente os efeitos do declive do terreno e do vento.

#### *Modelos físicos completos*

Uma das principais vantagens, do ponto de vista prático, da filosofia de modelação física completa, relativamente às filosofias empírica e física incompleta, reside na sua capacidade para criar modelos mais gerais. Concretamente, enquanto os modelos de propagação empíricos e físicos incompletos/semi-empíricos apresentados na Parte I, de previsão do comportamento de uma pequena secção da frente de fogo sob certas restrições, não são, em princípio, directamente generalizáveis, de modo a tornarem-se capazes de tratar as condições que se descrevem na introdução, já o mesmo não se passa com os modelos físicos completos. Por outras palavras, em princípio e mais ou menos imediatamente, qualquer um destes últimos modelos se pode aplicar à previsão do movimento de uma frente de fogo completa, para condições do leito e do ambiente não uniformes e variáveis na escala global, embora, neste caso, as limitações que pendem sobre estes modelos, mesmo ao nível local de previsão -a saber: deficiências funda-

mentais de modelação de alguns fenómenos, tempo de computação e dificuldade de obter a informação de entrada-, tornam-se agora mais graves e até, porventura, proibitivas.

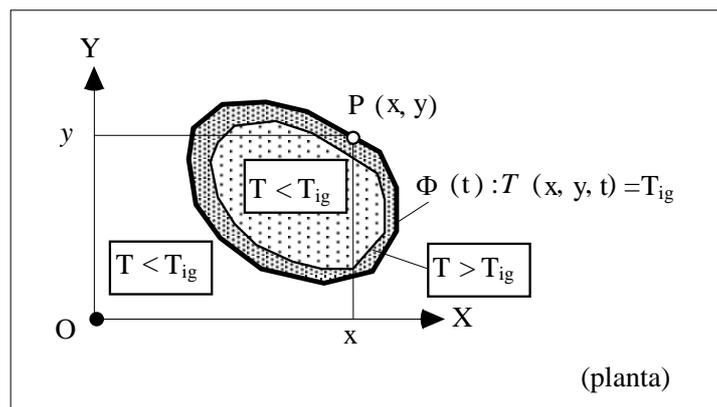
#### Modelos físicos (Quase-) completos que modelam apenas o leito

Vamos começar por apresentar o grupo de modelos físicos mais simples que já se podem considerar completos, embora apenas em sentido lato porque só modelam os fenómenos no leito combustível (como uma fase sólida contínua equivalente), esquecendo os fenómenos na fase gasosa. Neste grupo se situam, por exemplo, os modelos de: WEBER (1991b), MARGERIT e SERO-GUILLAUME (1998), e SANTONI e BALBI (1998). Apesar de, como se deixa entender acima, qualquer um destes modelos admitir uma formulação simplificada (unidimensional), aplicável no âmbito puramente local, na verdade, eles são essencialmente utilizados para prever o movimento de toda a frente de fogo. Daí que não tenham sido referidos

na Parte I.

De modo geral, pode considerar-se que estes modelos se baseiam numa forma simplificada das equações de conservação de energia e massa das partículas do leito contidas no interior de um volume de controlo paralelepédico (VC) com toda a altura do leito mas com secção horizontal de área infinitesimal ( $dx \cdot dy$ ). A sua principal informação de saída é a evolução temporal do campo bidimensional de temperatura média (ao longo da profundidade do leito) das partículas do leito, sobre o terreno,  $T = T(x, y, t)$ . Indirectamente, identificando a linha da frente  $\Phi(t)$  com uma isotérmica instantânea -tal como a que corresponde a uma temperatura de ignição  $T_{ig}$  pré-especificada, a qual tem equação  $T(x, y, t) = T_{ig}$ -, fica-se com uma descrição do movimento da frente de fogo (Figura 5)

A título ilustrativo, examinemos com um pouco mais de detalhe o modelo de SANTONI e BALBI (1998), por exemplo, para o caso em que o terreno é horizontal e não há vento.



**Figura 5** - Informação de saída proporcionada pelos modelos físicos quase-completos

A sua equação de conservação de massa no VC, no instante genérico  $t$ , baseia-se num modelo simplificado de pirólise e combustão das partículas, que consiste em assumir que a carga do leito  $W_0$  (massa de partículas por unidade de área do solo): se mantém constante e igual ao seu valor inicial, quando o VC está situado na parte do leito ainda não queimada (em  $t$ ), que se encontra a uma temperatura inferior a  $T_{ig}$ ; decai com o lapso de tempo  $(t - t_{ig})$ , decorrido desde que as partículas entram em ignição, segundo uma lei exponencial, quando o VC está situado no interior ou atrás da frente. Nesta equação (lei de decaimento exponencial da carga) aparece já um primeiro coeficiente empírico, a determinar *a posteriori* da forma que se refere abaixo, com o carácter de uma velocidade de combustão. De passagem, repare-se que, de acordo com esta lei, a partir do momento em que são atingidas pela frente, as partículas permanecem em combustão por um tempo indefinido, embora com uma taxa de consumo de massa progressivamente mais baixa. Passemos agora à correspondente equação de conservação da energia. Esta equação contem sempre um termo de armazenamento de calor sensível nas partículas (associado à sua variação de temperatura  $T$ ), e dois termos de fluxo de calor através da superfície do VC: um primeiro termo, representando uma entrada ou uma saída de calor consoante a posição do VC no leito, que tem carácter difusivo (o que implica uma certa forma matemática para o termo) e corresponde a um termo misto equivalente de troca de calor por radiação e convecção/condução, entre as partículas do VC e a sua vizinhança exterior (em princípio, próxima); e um

segundo termo, representando uma perda de calor por convecção, das partículas do VC para o ar ambiente mais frio. Quando o VC se encontra dentro ou atrás da frente  $\Phi(t)$ , surge um termo adicional na equação, de geração de calor interna ao VC, correspondendo à libertação de calor pela combustão das partículas do VC. No conjunto dos dois termos de fluxo calorífico e do termo de geração interna de calor, aparecem três coeficientes empíricos adicionais que representam: o coeficiente de difusão de calor equivalente dentro do leito,  $k$  [ $m^2/s$ ]; o coeficiente de convecção das partículas com o ar ambiente,  $K$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]; e o poder calorífico das partículas,  $Q$  [ $J/kg$ ]. (Na verdade, tal como está escrita a equação no modelo, embora os seus autores não o refiram, os coeficientes empíricos que há que determinar dependem também de outras grandezas físicas além das acabadas de referir.)

Os parâmetros de entrada do modelo, sobre o leito e o ambiente, são: a carga inicial do leito,  $W_0$  [ $kg/m^2$ ]; as temperaturas do ar ambiente  $T_a$  e de ignição das partículas  $T_{ig}$ ; e os quatro coeficientes empíricos que acima se indicam, que dependem, conjuntamente, do leito e do ambiente. O método que os autores propõem para determinar estes quatro coeficientes baseia-se no ajustamento empírico de uma curva de evolução da temperatura  $T = T(x_0, y_0, t)$ , num ponto arbitrário do leito com coordenadas  $(x_0, y_0)$ , obtida experimentalmente, num teste de propagação de uma frente rectilínea, infinita e estacionária, no leito e sob as condições ambientais em questão.

A validação laboratorial apresentada para este modelo é feita com uma frente

resultante de uma ignição pontual, nas condições do leito e do ambiente para as quais se obtiveram previamente os parâmetros de entrada que se acabam de referir. Os resultados são excelentes mas, na verdade, outra coisa não seria de esperar dado o método *a posteriori* escolhido para determinar quatro (dos sete) parâmetros de entrada do modelo. Na verdade, pelo menos de momento, este modelo carece de generalidade, mesmo em condições homogêneas e constantes do leito e do ambiente, pela forma como obriga a determinar um número significativo dos seus parâmetros de entrada. Além disso, também não se afigura fácil de generalizar para condições do leito e do ambiente não homogêneas e/ou não constantes.

Por último, chamamos a atenção para o importante trabalho de MARGERIT e SERO-GUILLAUME (1998), por provar, por via teórica, para o caso em que as condições do leito e ambientais são homogêneas e constantes, que duas variantes de um modelo deste tipo são compatíveis com os MGPF 1 e 2 da teoria de ANDRÉ e VIEGAS (1998b), o que evidencia a consistência física desta teoria, embora ela se situe, por assim dizer, num nível de modelação física mais superficial.

#### Modelos físicos completos que modelam o leito e a fase gasosa

Passando agora ao grupo dos modelos físicos mais estritamente completos, entre os autores que deram já o salto de generalidade mencionado contam-se: CLARK *et al.* (1998), LYMBEROPOULOS *et al.* (1998), e BOSSERT *et al.* (1998). Contudo, há que dizer que tanto CLARK *et al.* como Bossert *et al.*, incorporam, a uma escala local, um

modelo empírico de propagação (essencialmente, o modelo de Rothermel com as generalizações que se lhe aplicam no programa BEHAVE, e alguns aditamentos relacionados com o seu acoplamento com a parte física do modelo). Acresce que estes autores empregam meios de cálculo de alto desempenho, relativamente pouco acessíveis.

Pelo contrário, em LYMBEROPOULOS *et al.* (1998) descreve-se um verdadeiro modelo físico completo, embora simplificado, que, pelo menos nos casos práticos que os autores tratam (três fogos florestais selvagens, presumivelmente, de superfície e de média intensidade), apresenta tempos de computação inferiores aos tempos reais correspondentes, num computador (aparentemente) de médio porte. Além disso, nos mesmos casos, os autores reivindicam erros de previsão entre 12% e 25%, para parâmetros de saída como o tempo de chegada da frente a um dado ponto, ou a área total queimada. No entanto, a informação de entrada/saída disponível sobre estes fogos é tão escassa e incerta, que não parece prudente considerar que estes testes se tratam de validações fiáveis do modelo, tanto mais que os autores não são explícitos em relação aos métodos que empregam para obter os valores dos parâmetros de entrada do modelo.

#### **Sistemas informáticos implementando modelos de propagação**

O propósito desta última secção é apenas dar alguns exemplos ilustrativos dos programas de computador que têm sido criados com o objectivo de possibilitar a realização de cálculos com alguns dos modelos de propagação que

se passaram em revista, e os principais problemas que a sua construção e utilização levantam. Alguns destes programas possuem interfaces amigáveis com o utilizador e são do domínio público ou podem, pelo menos, ser comprados.

*O problema da determinação da informação de entrada dos modelos*

O primeiro problema que surge quando se pretende simular o comportamento de uma frente de fogo com um modelo de propagação adequado, é o da determinação dos valores dos parâmetros de entrada do modelo para as condições do leito e ambientais em que o fogo ocorre, mormente quando se trata de condições naturais e os domínios espacial e temporal de descrição são extensos (escala global de descrição). Neste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com a sua capacidade para processar grandes bases de dados georeferenciadas, proporcionam ferramentas de pré-/pós-processamento de dados de entrada/saída, e, até, ambientes de programação que facilitam muito o uso/implementação de modelos de propagação. Assim, por exemplo, os programas FIREMAP (VASCONCELOS, 1988) e FIRESTATION™ (LOPES *et al.*, 1998) estão programados, respectivamente, sobre o SIG MAP™ e sobre o CAD/SIG MICROSTATION™.

Um grupo de parâmetros de entrada que requer especial atenção e trabalho é o que caracteriza o leito combustível, dadas a heterogeneidade das propriedades e a irregularidade da distribuição espacial das partículas, para a maior parte dos leitos naturais. Torna-se assim difícil e trabalhoso obter valores estatísticos médios dos parâmetros, que

representem bem o leito do ponto de vista do modelo. Ao conjunto destes valores, para uns dados leito e modelo de propagação, costuma-se chamar modelo de combustível. Em face das dificuldades a que se acaba de aludir, um procedimento comum usado na construção de um modelo de combustível consiste em determinar empiricamente alguns dos seus parâmetros, de modo a ajustar as previsões do modelo de propagação aos valores experimentais medidos em testes auxiliares simples (por exemplo, de medida da velocidade de propagação de uma frente rectilínea e estacionária) realizados no leito em questão, ou até nos próprios testes-alvo. Naturalmente que um tal procedimento retira, em maior ou menor medida, o valor de validação aos testes em causa. Por outro lado, o facto de se identificarem padrões de vegetação mais ou menos regulares nos ecossistemas, permite a construção *a priori* de um catálogo de modelos de combustível, para uso de um determinado modelo de propagação, de modo a permitir *a posteriori* um reconhecimento expedito do modelo de combustível mais adequado para representar um dado leito natural, no limite por simples comparação visual com base em fotografias. Uma tal filosofia é seguida, por exemplo, pelos Serviços Florestais dos EUA, no sistema BEHAVE, em relação ao modelo de propagação de Rothermel que se apresenta na Parte I (BURGAN e ROTHERMEL, 1984, ANDERSON, 1982), muito tendo contribuído para a sua grande divulgação.

Uma outra questão importante que se coloca dentro do problema mais amplo da determinação dos parâmetros de entrada do modelo de propagação, é a necessidade de estimar, com sentido

histórico ou prognóstico, parâmetros dinâmicos, como sejam o campo de velocidade do vento ou de teor de humidade dos vários tipos de partículas que compõem o leito combustível, a partir de medidas experimentais ou previsões directas mas escassas (caso do vento, cujas propriedades se conhecem apenas nos pontos onde estão instaladas estações meteorológicas), ou, então, indirectas (caso mais frequente do teor de humidade das partes mortas da vegetação, o qual é estimado com base em dados meteorológicos e outros). A estimação do campo de velocidade do vento (imperturbado) próximo da frente de fogo é, neste contexto, particularmente complexa pois pode envolver, no caso mais geral, modelos de previsão relativamente diferenciados, em quatro grandes escalas espaciais, a saber: a escala sinóptica (da circulação atmosférica geral), a mesoescala (apenas sensível aos grandes acidentes de terreno), a escala da topografia mais complexa, e a escala da vegetação. O programa de previsão do vento na escala da topografia que tem sido mais utilizado dentro de sistemas de simulação do comportamento de frentes de fogos florestais é o NUATMOS (ROSS *et al.* 1988).

*Panorâmica ilustrativa dos programas de computador existentes*

Passando agora a dar uma panorâmica geral dos programas de computador que implementam alguns dos modelos de propagação existentes, consideremos, em primeiro lugar, a classe de programas que apenas fazem previsões com carácter local, e que estão, portanto, associados à classe de modelos apresentada na Parte I. O programa mais

conhecido desta classe é, sem dúvida, o BEHAVE (ANDREWS e BEVINS, 1998), um programa do domínio público, extensamente documentado, cuja versão original aparece em 1986, desenvolvido e mantido pelos Serviços Florestais dos EUA. Como se refere, este programa implementa, essencialmente, o modelo de propagação empírico-laboratorial de ROTHERMEL (1972). Ainda nesta classe de programas, encontra-se em fase avançada de desenvolvimento o programa FIRELAB (GUARNIERI *et al.*, 1998), implementando um conjunto numeroso de modelos de propagação, a maior parte dos quais são de carácter físico incompleto, mas incluindo também dois modelos físicos completos mais ou menos simplificados.

Dentro dos programas que fazem previsões sobre a frente de fogo na escala global, associados aos modelos de propagação da Parte II, o grupo mais numeroso implementa modelos que se integram na teoria de ANDRÉ e VIEGAS (1998b). Em quase todos os casos, o programa BEHAVE é empregue como MLP. Em relação aos MGPF que se implementam, temos, por exemplo: FMIS<sup>TM</sup> (EFTICHIDIS *et al.*, 1998), FIRESTATION<sup>TM</sup> (LOPES *et al.*, 1998), GEOFOGO (VASCONCELOS *et al.*, 1998) e CARDIN (MARTINEZ-MILLAN e SAURA, 1998), que utilizam o MGPF 1, através do algoritmo de Dijkstra; e FARSITE (FINNEY, 1998), que emprega o MGPF 2. Dos programas que implementam alguns dos modelos físicos completos, salientamos: AIOLOS (LYMBERPOULOS *et al.*, 1998), o pacote RAMS/HIGRAD/BEHAVE (BOSSERT *et al.*, 1998) e FIRETEC (LINN, 1997).

**Bibliografia**

- ANDERSON, D., CATCHPOLE, E., DE MESTRE, N., PARKES, T., 1982. Modelling the spread of grass fires. *Journal of the Australian Mathematical Society, Series B*, **23** : 451-466.
- ANDERSON, H.E., 1982. *Aids to determining fuel models for estimating fire behaviour*. United States Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report INT-122.
- ANDRÉ, J.C.S., 1996. *A theory on the propagation of surface forest fire fronts*. PhD. Mechanical Engineering Department, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra. 330 pp..
- ANDRÉ, J.C.S., VIEGAS, D.X., 1998a. Modelling of the propagation of a forest fire front: appraisal of an algorithm in common use (Dijkstra's algorithm). *Proc. 2nd Numerical Meeting on Partial Differential Equations (25-27 Feb, Coimbra, Portugal)*: 457-469.
- ANDRÉ, J.C.S., VIEGAS, D.X., 1998b. An unifying theory on the propagation of the fire front of surface forest fires. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I* : 259-279.
- ANDRÉ, J.C.S., VIEGAS, D.X., 2001. Modelos de propagação de fogos florestais: estado-da-arte para utilizadores. Parte I: Introdução e modelos locais. *Silva Lusitana* **9** (2) : 237-265.
- ANDREWS, P.L., BEVINS, C.D., 1998. Update and expansion of the BEHAVE fire behaviour prediction system. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I*: 733-740.
- BARROS, F.J., BALL, G.L., 1998. Fire modelling using dynamic structure cellular automata. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I* : 879-888.
- BOSSERT, J.E., REISNER, J.M., LINN, R.R., WINTERKAMP, J.L., SCHAUB, R., RIGGAN, P.J., 1998. Validation of coupled atmosphere-fire behaviour models. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I* : 647-659.
- BURGAN, R.E., ROTHERMEL, R.C., 1984. BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modelling system - FUEL subsystem. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). General Technical Report INT-167. 126 pp..
- CATCHPOLE, E.A., DE MESTRE, N.J., GILL, A.M., 1982. Intensity of fire at its perimeter. *Australian Forestry Research* **12** : 47-54.
- CLARK, T.L., COEN, J.L., RADKE, L., REEDER, M., PACKHAM, D., 1998. Coupled atmosphere-fire dynamics. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I* : 67-82.
- EFTICHIDIS, G., MARGARITIS, E., SFIRIS, A., VARELA, V., 1998. Fire management information systems: FMIS. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. II*: 2641-2642.
- FEUNEKES, U., 1991. Error analysis in fire simulation models. *MSc. Thesis*. Department of Forest Research, University of New Brunswick (New Brunswick, Canada). 75 pp.
- FINNEY, M.A., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator - Model development and evaluation. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Research Paper RMRS-RP-4. 47 pp.
- FRANDSEN, W.H., ANDREWS, P.L., 1979. Fire behaviour in nonuniform fuels. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-232.

- GUARNIERI, F., ANDERSEN, C.K., OLAMPI, S., CHAMBINAUD, N., 1998. FIRELAB: towards a problem solving environment to support forest fire behaviour modelling. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 483-496.
- KOURTIZ, P.H., O'REGAN, W.G., 1971. A model for a small forest fire to simulate burned and burning areas for use in a detection model. *Forest Science* **17**(2): 163-169.
- LINN, R.R., 1997. A transport model for prediction of wildfire behaviour. *PhD Thesis*. Department of Mechanical Engineering, New Mexico State University (Las Cruces, New Mexico). Also: Los Alamos National Laboratory, Report N. LA-13334-T.
- LOPES, A.M.G., CRUZ, M.G., VIEGAS, D.X., 1998. FIRESTATION - An integrated system for the simulation of wind flow and fire spread over complex topography. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 741-754.
- LYMBEROPOULOS, N., TRYFONOPOULOS, T., LOCKWOOD, F.C., 1998. The study of small and meso-scale wind field - forest fire interaction and buoyancy effects using the AIOLOS-F simulator. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 405-418.
- MARGERIT, J., SÉRO-GUILLAUME, O., 1998. Richards' model, Hamilton-Jacobi equation and temperature field equations of forest fires. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 281-294.
- MARTINEZ-MILLÁN, J., SAURA, S., 1998. CARDIN 3.2: forest fires spread and fighting simulation system. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 907-926.
- RICHARDS, G.D., 1990. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering* **30** : 1133-1149.
- RICHARDS, G.D., 1995. A general mathematical framework for modelling two-dimensional wildland fire spread. *Int. Journal of Wildland Fire* **5**(2) : 63-72.
- ROBERTS, S., 1989. A line element algorithm for curve flow problems in the plane. Centre for Mathematical Analysis, Australian National University. CMAR5889. 20 pp..
- ROSS, D.G., SMITH, I.N., MNINS, P.C., FOX, D.G., 1988. Diagnostic wind field modelling for complex terrain: model development and testing. *Journal of Applied Meteorology* **27** : 785-796.
- ROTHERMEL, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-115. 40 pp..
- ROTHERMEL, R.C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-143. 161 pp..
- SANTONI, P.A., BALBI, J.H., 1998. Numerical simulation of a fire spread model. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 295-310.
- VAN WAGNER, C.E., 1969. A simple fire-growth model. *Forest Chronicle* **45** : 103-104.
- VASCONCELOS, M.J., 1988. Simulation of fire behaviour with a geographic information system. *MSci. Thesis*. School of Renewable Natural Resources, University of Arizona (Tucson, Arizona).

- VASCONCELOS, M.J.P., PAÚL, J.C.U., GONÇALVES, A., 1998. GEOFOGO - Testing a forest fire simulation system. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14<sup>th</sup> Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I: 889-890.
- VIEGAS, D.X., RIBEIRO, P.R., MARICATO, L., 1998. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14<sup>th</sup> Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I: 325-342.
- WEBER, R.O., 1991b. Toward a comprehensive wildfire spread model. *Int. Journal of Wildland Fire* 1(4): 245-248.
- Entregue para publicação em Maio de 2001*  
*Aceite para publicação em Setembro de 2001*