

Modelagem e Avaliação de Táticas de Combate ao Fogo em Incêndios Florestais

Rodolfo Maduro Almeida¹, Elbert E. Nehrer Macau², Fernando Manuel Ramos²

¹Curso de Pós-graduação em Computação Aplicada
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12.227-010 – São José dos Campos – SP

²Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada,
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12.227-010 – São José dos Campos – SP
{rodolfo,elbert,fernando}@lac.inpe.br

Resumo. *Esta tese de doutorado propõe-se a desenvolver um modelo híbrido para a simulação e avaliação de estratégias de combate ao fogo em incêndios florestais. O modelo é constituído de duas partes. Na primeira temos um modelo espacialmente explícito para caracterizar o comportamento do fogo sobre a vegetação. A segunda parte é um modelo baseado em agentes que representa as estratégias de combate ao fogo. Enquanto o modelo espacialmente explícito projeta o cenário de desenvolvimento de um incêndio sob determinadas condições ambientais, o modelo baseado em agentes representa e avalia as estratégias de combate ao fogo que podem ser aplicadas a este cenário.*

1. Introdução

Um incêndio florestal é a presença do fogo que se propaga em condições extremas e fora de controle consumindo a vegetação. O estudo do comportamento do fogo em incêndios florestais é um ingrediente importante para auxílio à tomada de decisão em atividades de manejo do fogo tais como a execução de queimadas controladas e estratégias de combate ao fogo. Nesse aspecto, a ciência que estuda o fogo em vegetação desenvolve estudos para caracterizar o comportamento do fogo, que varia tanto no espaço quanto no tempo, quando este se propaga sobre a vegetação. Assim, estes estudos envolvem o desenvolvimento de modelos para simular a propagação do fogo sobre a paisagem, e integram informações acerca dos principais conjuntos de fatores diretamente relacionados com o comportamento do fogo que são informações da vegetação, topografia e condições atmosféricas (Pyne et al., 1996).

Através de condições iniciais pré-estabelecidas, estes modelos projetam o cenário de desenvolvimento do incêndio, caracterizando a progressão da frente de fogo sobre a vegetação, o comprimento das chamas, e a quantidade de calor produzido na frente de (Pastor et al., 2003). O desenvolvimento de programas de computador que integrem esses modelos com sistemas de informações geográficas tem levado a um salto qualitativo no desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam na tomada de decisão em manejo do fogo, tais como o sistema de previsão de comportamento do fogo BEHAVE (Andrews et al., 2003) e o simulador de propagação de incêndios FARSITE (Finney, 2004).

Este trabalho propõe-se a combinar, tomada de decisão para combate ao fogo em incêndios florestais, incluindo geração do plano de execução e adaptação dinâmica das táticas de combate. Os cenários de propagação de incêndios simulados serão combinados com dados biofísicos da paisagem e um conjunto de regras aplicadas sobre estes dados definem as estratégias de combate. Aqui descreveremos detalhes do modelo híbrido. Na primeira parte falaremos do modelo mecanicista. A segunda parte inclui a descrição das estratégias de combate a incêndios e da modelagem baseada em agentes. Por fim falaremos sobre o contexto de aplicação do modelo e os resultados esperados desta pesquisa de doutorado.

2. Modelo de propagação do fogo

O modelo computacional para o avanço da frente de fogo sobre a paisagem é baseado no FARSITE Simulator Core (FireLab, 2009), uma interface para programação de aplicativos (API) que disponibiliza apropriadamente todas as funcionalidades básicas do simulador de propagação de incêndios FARSITE (Finney, 2004). Desta API, utilizamos somente o módulo para simulação da propagação do fogo em incêndios de superfície. O algoritmo para modelar a propagação da frente de fogo é baseado na aplicação do princípio de Huygens para simular a propagação de uma frente de onda (Richards, 1990). O algoritmo de propagação baseia-se na observação que, sob condições atmosféricas constantes e para uma vegetação homogênea, a frente de fogo expande-se em uma taxa constante assumindo uma forma elíptica. A equação que representa a expansão dos pontos da elipse pode ser dada por:

$$\begin{aligned} x(\phi, t) &= a \cdot t \cdot \cos \phi \\ y(\phi, t) &= a \cdot t \cdot \sin \phi \end{aligned} \tag{1}$$

onde t é o tempo, a origem $(x, y) = (0, 0)$ sendo o ponto de ignição e o eixo y o eixo da direção do vento. As taxas de expansão frontal v , lateral u e traseira w da frente de fogo, são definidas como, respectivamente, $b + c$, a , $b - c$, onde os parâmetros a , b e c relacionam-se com a forma da elipse. A frente de fogo num instante de tempo t é representada parametricamente em coordenadas cartesianas pela curva fechada $(x(\phi, t), y(\phi, t))$ onde $0 \leq \phi \leq 2\pi$, ver Figura 1(a).

Pelo princípio de Huygens, assume-se que cada ponto sobre a frente de fogo é uma ignição pontual de uma pequena frente de fogo que, passado um tempo intervalo de tempo dt , caracteriza uma elipse. Tomando θ como o ângulo que define a direção do vento e que varia no sentido horário com o eixo y , esta elipse é gerada pela Equação (1) assumindo $t = dt$, com ponto de ignição $(x(\phi, t), y(\phi, t))$, e os parâmetros a , b e c sendo definidos pelas condições de vegetação, vento e topografia em um dado ponto. O intervalo de tempo dt deve ser suficientemente pequeno para que os parâmetros a , b e c sejam assumidos constantes ao longo deste intervalo de tempo. A nova posição da frente de fogo, para o instante de tempo $t + dt$, é agora definida pelo envelope exterior das elipses geradas em cada ponto da curva que define a frente de fogo no instante de tempo t . O ponto tangencial de contato do envelope com a elipse gerada em $(x(\phi, t), y(\phi, t))$ define um novo ponto $(x(\phi, t + dt), y(\phi, t + dt))$, ver Figura 1(b). Richards (1990) propôs que, para um dado instante de tempo t , a taxa de expansão das elipses partindo de um ponto $(x(\phi, t), y(\phi, t))$ da frente de fogo, dada pela equação:

$$\begin{aligned}
x_t &= \frac{a^2 \cos \theta (x_\phi \sin \theta + y_\phi \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_\phi \cos \theta - y_\phi \sin \theta)}{\sqrt{b^2 (x_\phi \cos \theta - y_\phi \sin \theta)^2 + a^2 (x_\phi \sin \theta - y_\phi \cos \theta)^2}} + c \sin \theta \\
y_t &= \frac{-a^2 \sin \theta (x_\phi \sin \theta + y_\phi \cos \theta) - b^2 \cos \theta (x_\phi \cos \theta - y_\phi \sin \theta)}{\sqrt{b^2 (x_\phi \cos \theta - y_\phi \sin \theta)^2 + a^2 (x_\phi \sin \theta - y_\phi \cos \theta)^2}} + c \cos \theta
\end{aligned} \quad (2)$$

onde, x_t e y_t são as derivadas das componentes x e y em relação ao tempo e , x_ϕ e y_ϕ as derivadas em relação ao ângulo ϕ da equação paramétrica da elipse. A Equação (2) representam o crescimento do envelope partindo de um ponto inicial $(x(\phi, 0), y(\phi, 0))$.

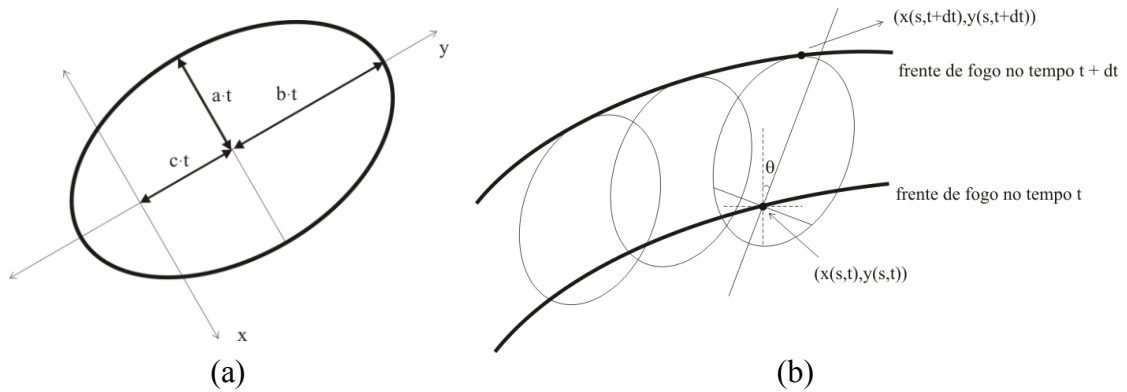


Figura 1: (a) Forma da frente de fogo em um instante de tempo t para vento constante soprando na direção y . (b) Envelopes de elipses formando a frente de fogo em um instante de tempo $t + dt$. Fonte: (Richards, 1990).

A direção de propagação e a forma (excentricidade) das elipses variam em função da intensidade e direção da máxima velocidade de propagação, sendo obtida como o efeito combinado do vento e de elevações na superfície. A excentricidade é caracterizada pela razão comprimento-largura de cada elipse. Equações são desenvolvidas para expressar essa relação em função dos parâmetros que a influenciam e ajustam os valores θ , a , b e c relacionados à forma das elipses. O modelo de Rothermel (Rothermel, 1972) fornece a estimativa da máxima velocidade de propagação da frente de fogo. Através do modelo de Rothermel são também obtidas estimativas para o comprimento e ângulo de inclinação das chamas, e o calor emitido pela frente de fogo. Para que seu valor seja calculado, dados geográficos devem ser fornecidos, e contém as seguintes informações (Finney, 1999):

- Altitude: usado para fazer ajustes da temperatura atmosférica, teor de umidade e do campo de vento sobre a superfície.
- Declives e Aspecto: usado para (1) calcular os efeitos diretos sobre a propagação do fogo; (2) quando combinado com o aspecto, possibilita o cálculo do ângulo da radiação solar incidente (que varia com latitude, data e hora do dia); e (3) é utilizado pelo algoritmo de propagação para converter a forma da frente de fogo para coordenadas horizontais.
- Modelo de combustível: fornece a descrição física do combustível superficial e é utilizado para calcular o comportamento do fogo. É uma tabela que classifica a vegetação em diferentes categorias e classes de tamanho, e contém os seguintes

parâmetros descritivos: relação área de superfície-volume, carga combustível, teor de umidade limiar de extinção, poder calorífico e espessura do leito combustível.

- Porcentagem de cobertura da copa: usado para determinar o efeito de sombreamento sobre os combustíveis superficiais e que afetam os cálculos do teor de umidade do combustível. Ajuda também a determinar os efeitos de redução da velocidade do vento próximo a superfície.
- Altura da copa: Utilizado para ajustar o valor da velocidade do vento próximo da superfície.
- Velocidade e direção do vento: utilizado para calcular o comportamento do fogo.

Através do modelo de propagação do fogo o cenário do incêndio será simulado e fornecerá informações importantes para o modelo baseado em agentes. O algoritmo de propagação fornecerá informações acerca das proporções do incêndio. Paralelamente, o modelo de Rothermel fornecerá estimativas de variáveis que caracterizam o comportamento do fogo.

3. Modelo baseado em agentes

Aqui estamos interessados em investigar cenários de tomada de decisão em técnicas de combate a incêndios florestais. O modelo de propagação reproduzirá o cenário de propagação de um incêndio, fornecendo informações acerca do comportamento do fogo. Um modelo baseado em agentes representará o processo de tomada de decisão envolvendo as técnicas de combate ao fogo. Partindo de estratégias que definem o comportamento dos agentes e de interações entre os agentes e entre estes e o ambiente, um conjunto de possíveis cenários serão simulados e explorados. Cada técnica de combate é representada por diferentes comportamentos e interações dos agentes. Para cada cenário, uma série de combinações de técnicas de combate são desenvolvidas e aplicadas de forma organizada visando controlar o desenvolvimento do incêndio. Dessa forma, modificações de comportamento dos agentes e suas interações serão aplicadas para resolver o seguinte problema: “Dado um cenário de propagação de incêndio, um conjunto de variáveis biofísicas da região em que o incêndio ocorre, e recursos físicos e humanos disponíveis, qual a melhor tática para combater o incêndio?”.

De acordo com a literatura (Show,1953; Couto,1995), a operação de combate ou supressão de um incêndio envolve seis etapas distintas: detecção, comunicação, mobilização e deslocamento de pessoal, planejamento e combate. Assim que detectado o incêndio, o encarregado por dirigir o combate deve se deslocar ao local e analisar a frente de fogo, aspectos da área atingida, proporções do incêndio, a intensidade da queima e comprimento das chamas, a direção e velocidade do vento. Além disso, deve localizar fontes de água próximas e acidentes naturais, tais como rios e estradas, que podem contribuir com na extinção do incêndio. Estes dados permitem avaliar rapidamente o presente e futuro do incêndio e ajudar no planejamento do combate, definindo questões como pessoal a ser mobilizado, como dividir o grupo e onde alocar o pessoal para atacar o fogo, que pontos são prioritários para o combate e quais equipamentos serão utilizados. Após o diagnóstico da situação em que ocorre o incêndio o contingente disponível para combate é mobilizado e, caso precise de mais pessoas, estas devem se deslocar para a região.

Na execução do plano de combate, existem quatro métodos para combater o fogo: método direto, método paralelo ou intermediário, método indireto e método aéreo. No método direto o fogo é atacado diretamente com água (usando bombas cortais e motobombas), terra (com uso de pás) e batidas (com uso de abafadores de borracha ou ramos de árvore). O método paralelo é utilizado quando o calor da frente de fogo não favorece o combate direto, e consiste na construção de barreiras artificiais em forma de linhas paralelas adiante da frente de fogo. Estas barreiras recebem o nome de aceiro, e provoca uma quebra na continuidade da vegetação, interrompendo a propagação do fogo. A construção do aceiro pode ser efetuada com o uso de ferramentas manuais, como enxadas, ou tratores de lâmina. As condições topográficas devem ser favoráveis para a construção. O método indireto é utilizado quando a aproximação à frente de fogo é inviável. Consiste na construção de um aceiro, como um método paralelo, e uso de contra-fogo. O contra-fogo consiste numa técnica de queima da vegetação contida entre o aceiro e a frente de fogo, onde uma frente de fogo contrária à do incêndio é construída. O método aéreo consiste no lançamento de água ou retardantes químicos a partir de aeronaves que sobrevoam a frente de fogo.

Rothermel e Rinehard (1983) propuseram quatro confiáveis regras para aplicação dos métodos de combate a incêndio. Estas regras são baseadas no comprimento das chamas (L) e pode ser sumarizada como segue:

1. Se $L < 1,2$ metros, o fogo pode ser geralmente combatido na cabeceira e nos flancos da frente de fogo por método direto.
2. Se $L > 1,2$ metros e $L < 2,4$ metros, o fogo torna-se intenso para ser combatido por método direto na região da cabeceira. O método aéreo ou paralelo pode ser eficiente.
3. Se $L > 2,4$ metros e $L < 3,4$ metros, os esforços de controle do fogo provavelmente serão ineficientes. O método de combate indireto é provavelmente a melhor forma de supressão.
4. Se $L > 3,4$ metros, quaisquer esforços de controle por qualquer meio não terão eficiência na cabeceira do incêndio. O ataque indireto pode conter ou apenas diminuir a intensidade a propagação do fogo em certas direções.

Na estrutura do modelo temos que o ambiente onde os agentes atuam e se relacionam é representado pela região onde o incêndio está ocorrendo. O espaço celular que representa a paisagem contém camadas de dados que incluem atributos como tipo de vegetação, biomassa seca acumulada na superfície, obstáculos naturais, distância a fontes de água, distância a estradas, altitude e declividade. As concepções e verificações relacionadas às estratégias de controle do incêndio serão definidas por uma coordenação centralizada. Um agente, chamado aqui de *agente-líder*, terá conhecimento global do ambiente e irá monitorar as mudanças que podem ocorrer durante a reprodução de um cenário de um incêndio pelo modelo de propagação.

O *agente-líder* representa o papel do encarregado por dirigir o combate, e possui um conjunto de regras de comportamento e conhecimento a priori necessário para avaliar, em função dos recursos disponíveis, para um dado instante de evolução do cenário de propagação do incêndio, quais estratégias devem ser tomadas para efetivar um eficiente combate ao incêndio. As suas regras de comportamento em função das ações necessárias para o planejamento e execução do combate. Seu conhecimento a priori compreende a informação do estado de evolução, as camadas de atributos do espaço

celular descritas anteriormente e o contingente e recursos físicos disponíveis para a execução do combate. Assim, o *agente-líder* terá toda a informação necessária para indicar as regiões onde se deve combater o fogo e seqüenciá-las de acordo com prioridades. Além disso, ele indicará quais os métodos de combate viáveis para cada e distribuirá o contingente disponível em equipes para atuar nas regiões. Regras relacionadas a Planos de Manejo do Fogo de Unidades de Conservação podem também ser incluídas nas estratégias do *agente-líder*.

O contingente disponível e seus recursos serão representados por agentes. Cada um integrante do contingente será chamado aqui de *agente-combatente*. Cada *agente-combatente* será alocado a uma equipes de combate para cumprir o objetivo de atuar no combate ao incêndio. Assim, além de serem dotados de conhecimento necessário para efetivar as suas ações, que inclui regras para implementação dos métodos de combate, o *agente-combatente* tem a habilidade de se comunicar e cooperar com os membros de sua equipe de combate, haja visto que todos tem um mesmo objetivo. O número de integrantes de cada equipe pode variar, dependendo da indicação do *agente-líder*. Informações necessárias para determinar o número de pessoal deslocado para cada região e a eficiência de cada técnica de combate dependem de dados que serão coletados em campo durante essa pesquisa. Na simulação das técnicas de combate, espera-se ter uma estimativa da eficiência da ação, podendo ser contabilizada em custo para transporte de pessoal e tempo gasto para combater o incêndio. Atributos que quantificam o cansaço ou habilidade de combate podem ser incluídos para caracterizar a heterogeneidade entre os combatentes.

4. Contexto de aplicação e resultados esperados

O modelo de cenários de técnicas de combate a incêndios será aplicado na região do 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.

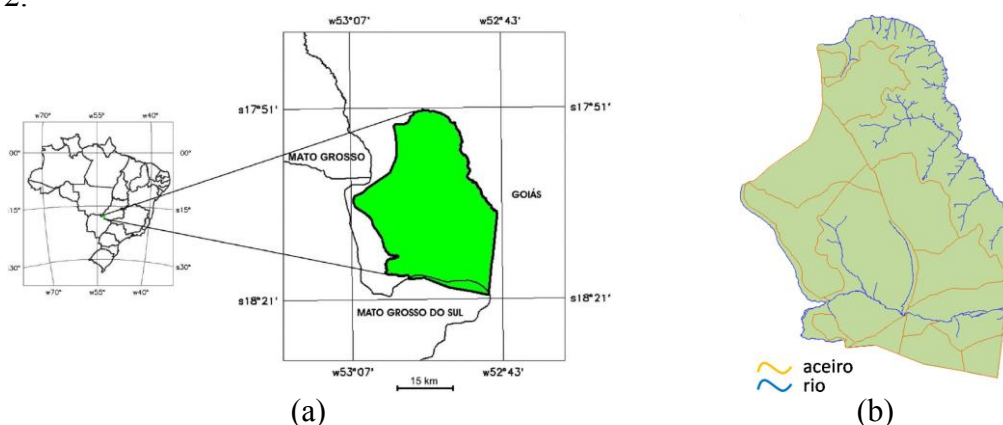


Figura 2: (a) Localização do Parque Nacional das Emas. (b) Indicação dos limites do Parque Nacional das Emas, sua malha de aceiros e rios.

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, foram mapeados todos os incêndios que ocorreram no

período de 1973 até o presente. Este mapeamento de incêndios é fruto de trabalho principalmente da Dra. Helena França (França, 1997; França et al., 2007) e do Dr. Mário Barroso Ramos-Neto (Ramos-Neto, 2000). Para a região do Parque, dispomos de um banco de dados geográficos com os incêndios mapeados por períodos anuais. Estas informações de incêndios podem ser combinadas para se obter estimativas de biomassa seca acumulada na superfície do Parque (anos sem queima). Além dos dados de incêndios mapeados, o banco de dados também contém informações acerca da topografia, vegetação, rios, malha de aceiro/estradas, dados de focos de calor disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados de focos de calor podem dar indícios do instante em que os incêndios começaram. Relatórios de Ocorrência de Incêndios no Parque feitos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA) também serão utilizados, e estes fornecem detalhes dos incêndios, informando se houve combate ao fogo, as estratégias adotadas e os recursos humanos e físicos utilizados. Dados de uma estação meteorológica existente no interior do Parque fornecem informações a respeito do histórico de condições atmosféricas dos incêndios mapeados. Estas informações, quando combinadas, permitem a caracterização do ambiente em que os incêndios ocorreram e fornecem subsídios para o estudo da modelagem do comportamento do fogo (Almeida, 2008) e de técnicas de combate a incêndios no Parque.

Referências

- Almeida R. M., Macau E. E. N., Ramos F. M., França, H., Carneiro T. G. S. "Simulando padrões de incêndios no Parque Nacional das Emas, Estado de Goiás, Brasil". In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Geoinformática (GEOINFO 2008). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Sociedade Brasileira de Computação, 2008.
- Anderson H. E., "Predicting wind-driven wildland fire size and shape". Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983. (Gen. Tech. Rep. INT-305).
- Andrews, P. L., Bevins, C. D., Seli, R. C., 2003, "BehavePlus fire modeling system, version 2.0 – User's Guide", Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW, Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Couto E. A., Candido, J. F., 1995, "Incêndios Florestais". 2. ed. Viçosa, MG, Brasil: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1995.
- FireLab, <http://www.firelab.org/content/category/23/213/>. Último acesso em: 20 de junho de 2009.
- Finney, M.A., 1999. "Mechanistic modeling of landscape fire patterns". In: Mladenoff, D.J., Baker, W.L. (Eds.), *Spatial Modeling of Forest Landscapes: Approaches and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 186–209.
- Finney M. A., 2004, "FARSITE (Fire Area Simulator): model development and evaluation". Research Paper RMRS-RP-4, Missoula, MT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- França, H., 1997, "Regime das queimadas no Parque Nacional das Emas, GO: 1973-1995". Relatório de Pesquisa FAPESP. Processo n. 95/2674-9.

- França H., Ramos-Neto, M. B., Setzer, A., 2007, "O fogo no Parque Nacional das Emas". In: Biodiversidade. Brasília, DF, Brasil: Ministério do Meio Ambiente.
- Pastor E., Zárate L., Arnaldos J., 2003, "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire Behavior". Progress in Energy and Combustion Science, v. 29, n. 2, pp. 139-153.
- Pyne J. S., Andrews P. L., Laven R. D., 1996, "Introduction to wildland fire", 2. ed., New York, NY: John Wiley & Sons.
- Ramos-Neto M. B., 2000, "O Parque Nacional das Emas (GO) e o fogo: Implicações para a conservação biológica". Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Richards G. D., 1990, "An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution", International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 30, 1163–1179.
- Rothermel R. C., 1972, "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels", Gen. Tech. Rep. INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Rothermel R. C., Rinehard G. C., 1983, "Field procedures for verification and adjustment of fire behavior predictions". Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Show S. B., Clarke, B., 1953, "Forest fire control". Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, (FAO Forestry and Forest Products Studies).