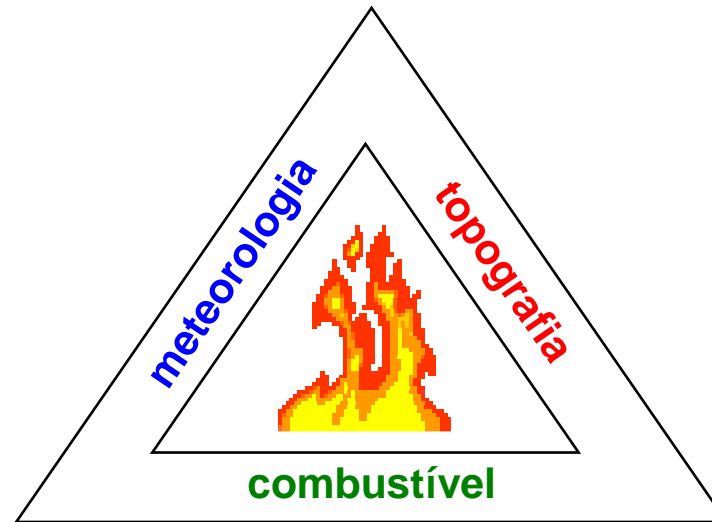

COMPORTAMENTO DO FOGO

COMPORTAMENTO DO FOGO

Triângulo do comportamento do fogo



- **Comportamento do fogo:** o modo como os combustíveis entram em ignição, a chama se desenvolve e o fogo se propaga, sob controle das interações entre combustíveis, meteorologia e topografia.
- A topografia é estática, mas varia no espaço; os combustíveis variam no espaço e no tempo; a meteorologia é o factor mais dinâmico e heterogéneo.

COMPORTAMENTO DO FOGO

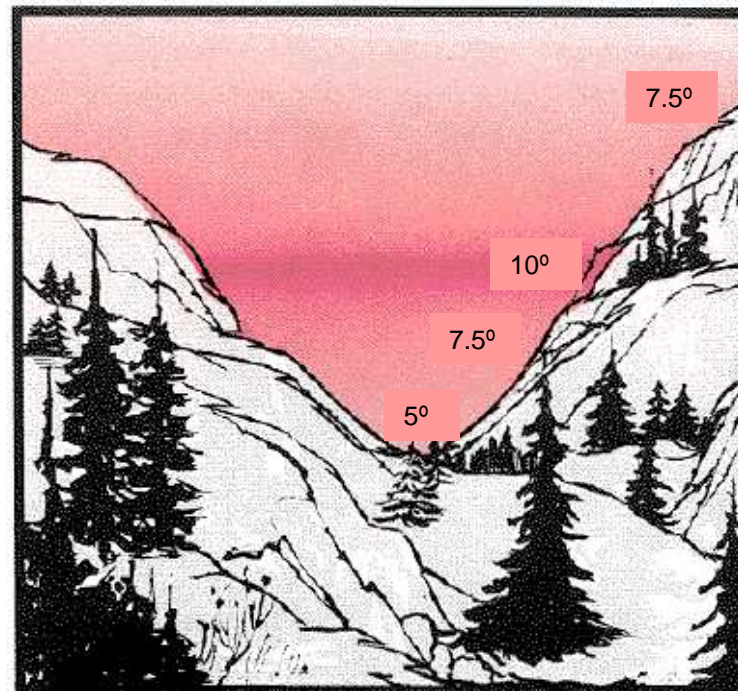
■ Topografia:

- declive
- exposição
- altitude
- formas do terreno

■ Afecta o crescimento da vegetação e a meteorologia. Induz heterogeneidades que se reflectem no comportamento do fogo.

■ A **altitude** influencia o clima em geral e, portanto, a disponibilidade de combustível. A precipitação tende a aumentar e a temperatura a diminuir com a altitude \Rightarrow época de incêndio + curta.

COMPORTAMENTO DO FOGO



The zone of warm nighttime temperatures near the top of the inversion is known as the thermal belt.

- A **cintura térmica** é uma área relativamente quente, a meia encosta, onde uma zona de inversão térmica contacta o terreno. À noite é mais quente e seca que as zonas acima e abaixo, podendo gerar comportamento mais severo do fogo.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- A **exposição** é a orientação das encostas. Afecta o comportamento do fogo através das variações de radiação solar incidente.
- No hemisfério N, as exposições S e SW são consideradas as mais favoráveis ao início e propagação dos fogos. Porém, em regiões semi-áridas, poderão ter pouco combustível.
- A **intensidade da radiação solar** é máxima quando a encosta está perpendicular ao ângulo de incidência do Sol. No hemisfério N os combustíveis das encostas expostas a E secam mais cedo no dia, mas não secam tanto como os das exposições W.
- A radiação solar incidente numa encosta varia com a exposição, o declive, a hora, dia e mês do ano. O declive também afecta a velocidade de propagação do fogo.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- As **ravinas** e os **canyons** afectam o fogo. A radiação emitida pelo fogo numa encosta pode secar o combustível na encosta adjacente, que fica vulnerável à ignição por fagulhas.
- A topografia proporciona **barreiras** à propagação do fogo: afloramentos rochosos, áreas de solo nú, lagos, riachos e zonas de acumulação de humidade.
- O **efeito de chaminé** pode ocorrer em ravinas muito declivosas, com 3 paredes. O fluxo normal de ar ascendente é rápido e afunilado pela forma do terreno. Verifica-se quando a atmosfera instável à superfície cria uma corrente de convecção na ravina, sugando ar junto à base e expelindo-o pelo topo. Tem causado a morte de muitos bombeiros.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Efeito de chaminé modelado em laboratório (DX Viegas, U. Coimbra)

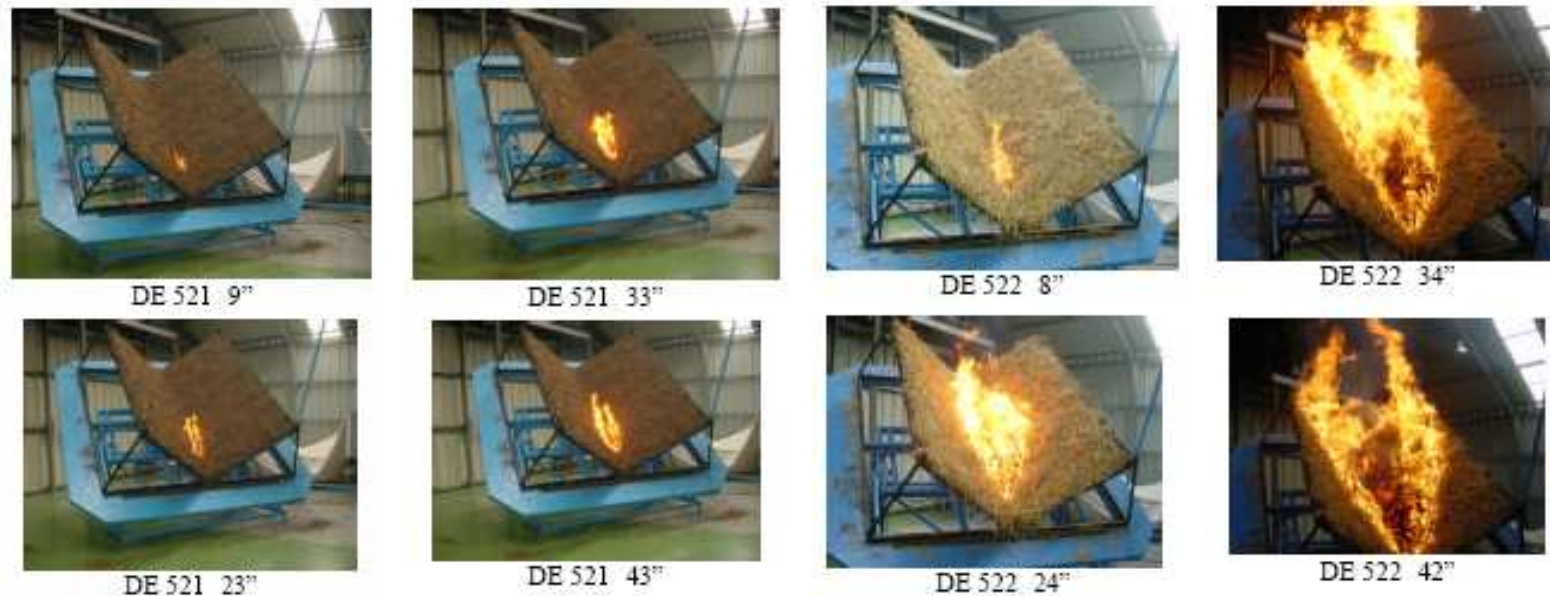


Figure 22 – Fire growth during tests DE 521 and DE522 with two different fuels. Time since fire origin in seconds is indicated below each picture.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Efeito de chaminé em fogo florestal no Oregon, USA.



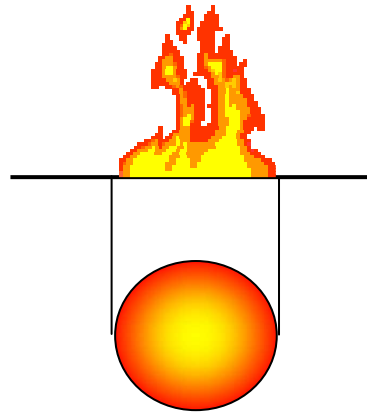
APPLE FIRE: Blowup on Division X on 08/27/2002

COMPORTAMENTO DO FOGO

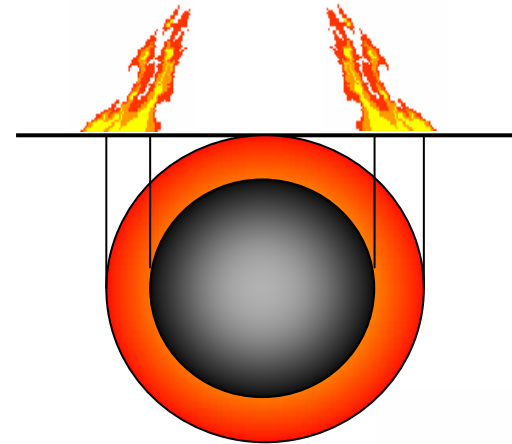
- O crescimento de um fogo pode ter várias fases:
 - ignição
 - transição para a propagação e aceleração
 - propagação em regime estacionário
 - aumento de intensidade e comportamento extremo
- O fogo tende a iniciar-se num ponto. Quando o combustível no foco de ignição se esgota as chamas alastram, formando um perímetro linear que vai expandindo, forma uma coroa circular e deixa no interior uma área queimada.
- Quando o fogo adquire esta forma, aumenta o arejamento da combustão e dá-se uma descida de temperatura e da altura das chamas, relativamente à fase inicial do fogo.

COMPORTAMENTO DO FOGO

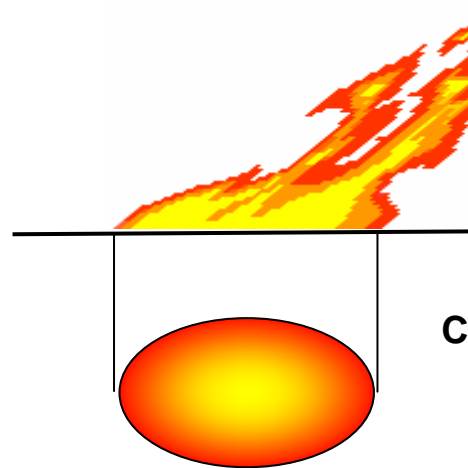
Início do fogo



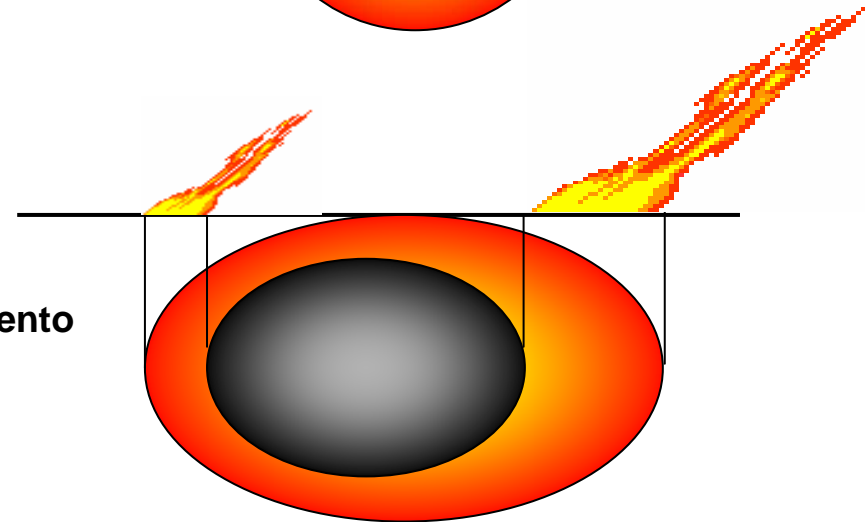
Sem vento



Transição para a propagação



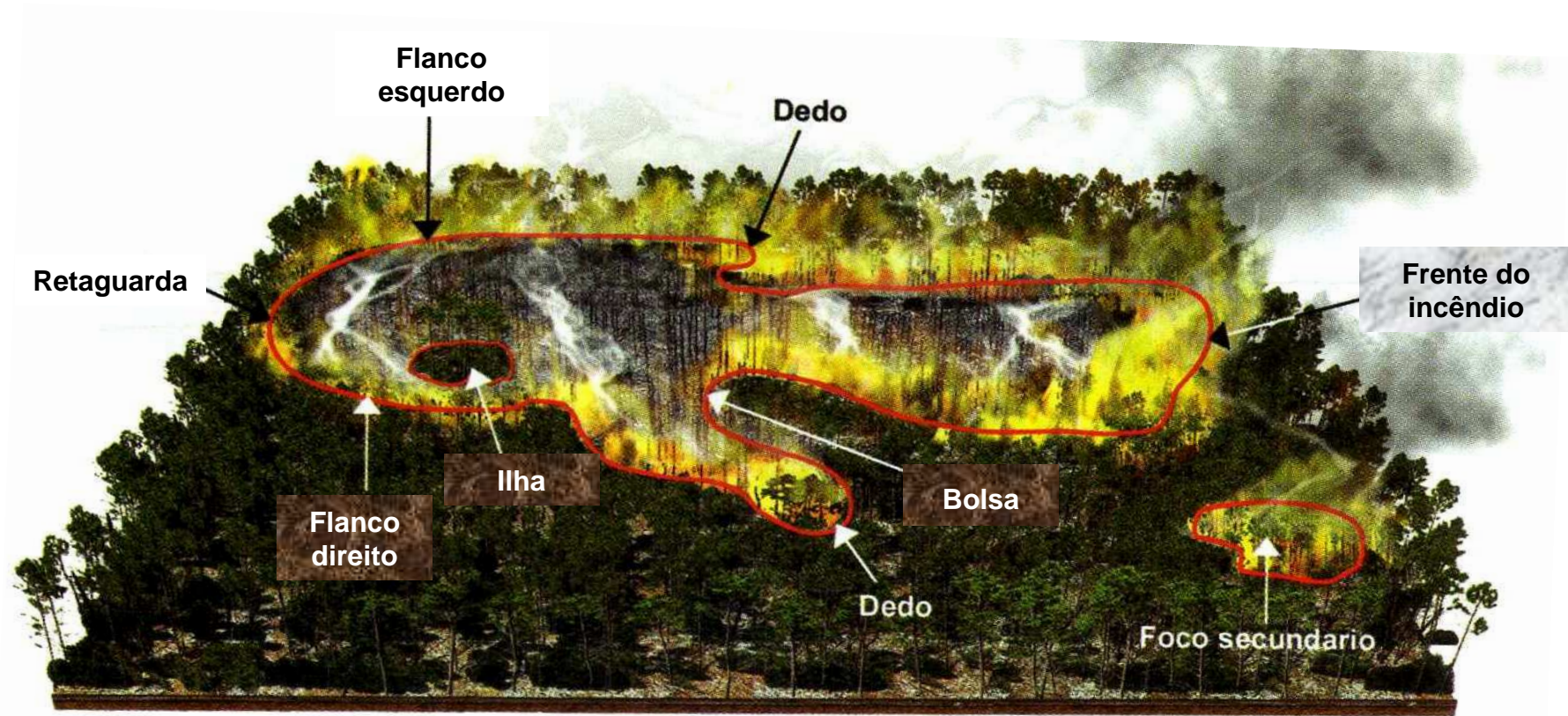
Com vento



COMPORTAMENTO DO FOGO

- Em terreno plano, combustível homogéneo e sem vento, a propagação do fogo é igual em todas as direcções e tem forma circular.
- Com declive ou vento, as chamas inclinam-se e o fogo assume forma elíptica.
- Ao fim de algum tempo diferenciam-se as principais partes de um fogo:
 - frente ou cabeça
 - retaguarda
 - flancos

COMPORTAMENTO DO FOGO



Terminologia descritiva de um incêndio florestal

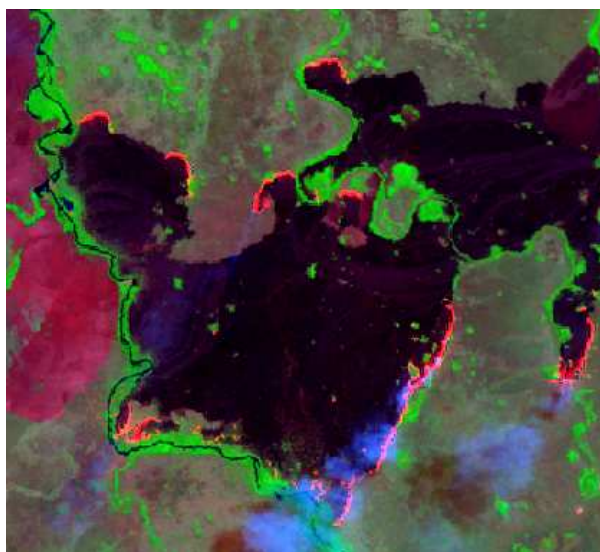
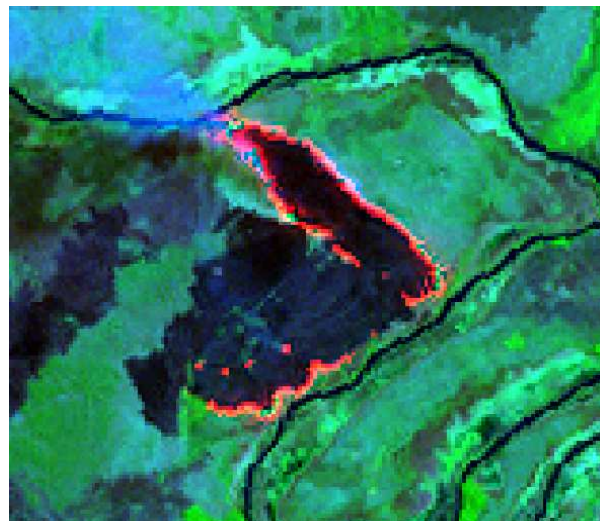
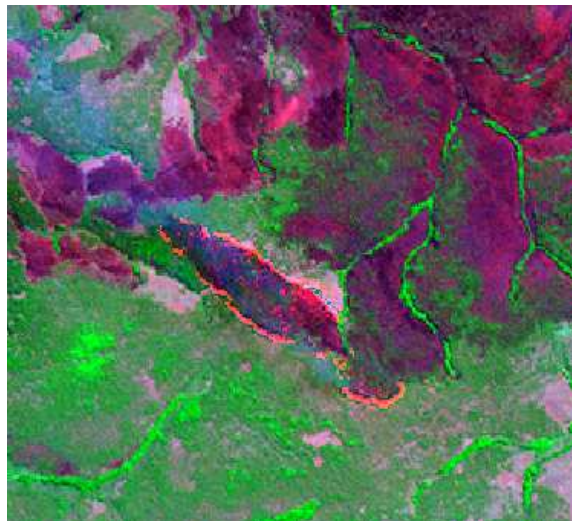
COMPORTAMENTO DO FOGO

- Quando a **aceleração** da propagação estabiliza, o fogo atinge um comportamento de propagação em equilíbrio, ou **quase-estacionário**.
- **Não** quer dizer que o fogo arde com velocidade de propagação e intensidade constantes, quaisquer que sejam as suas condições ambientais.
- O comportamento dos fogos em regime quase-estacionário é **controlado pelas condições ambientais** que determinam a geometria do perímetro de chamas e cuja propagação se faz de forma contínua, em combustíveis superficiais.
- Isto distingue-os dos fogos iniciais, em que há interacção entre diferentes zonas do perímetro de chamas e dos grandes incêndios, que criam condições ambientais locais que afectam o seu próprio comportamento.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Características dos fogos quase-estacionários:
 - são **auto-sustentados**.
 - exibem um **perímetro de chama**, aproximadamente **elíptico**.
 - a forma altera-se e o tamanho aumenta, mas a **intensidade** mantém-se razoavelmente **estável**.
 - propagam-se pela **superfície**, com transferência de calor por **radiação**, aproximadamente constante e complementada por convecção na frente de chamas.

COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO

- Uma alteração das condições meteorológicas ou do tipo e quantidade de combustível disponível, podem provocar a transição para um **grande incêndio**.
- Os grandes incêndios exibem muito **maior intensidade** de libertação de calor e apresentam **novos mecanismos de propagação**, com maior relevância da transmissão de calor por **convecção**.

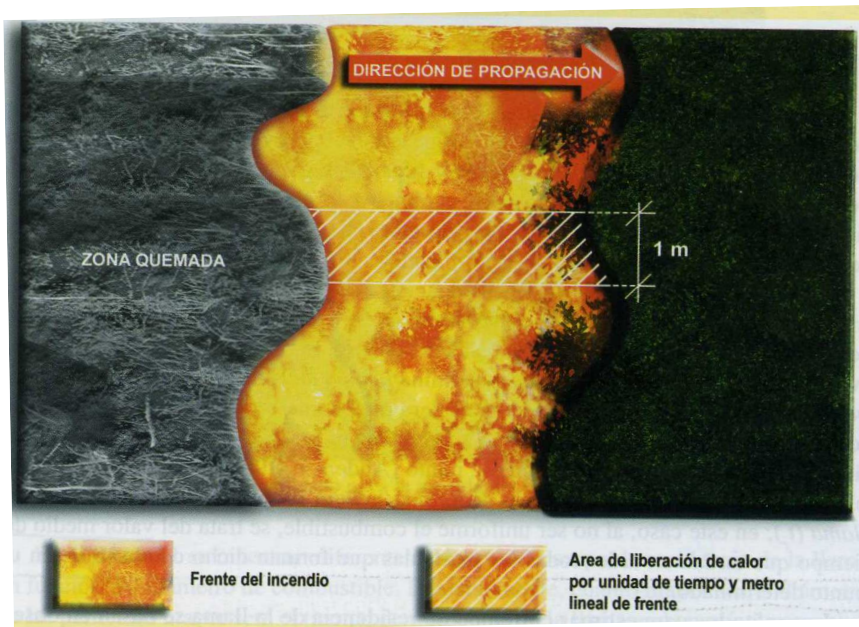


COMPORTAMENTO DO FOGO

- Comportamentos extremos

COMPORTAMENTO DO FOGO

- A **intensidade do fogo** é a sua taxa de libertação de calor, i.e. a quantidade de calor libertada por unidade de tempo. Há várias medidas de intensidade de um fogo.
- A **intensidade da frente de chamas**, ou intensidade de Byram (I_B), mede a taxa de libertação de calor por metro linear da frente de chama.



$$I_B = h.w.r$$

I_B – intensidade da frente (kW.m^{-1})

h – conteúdo calorífico (kJ.kg^{-1})

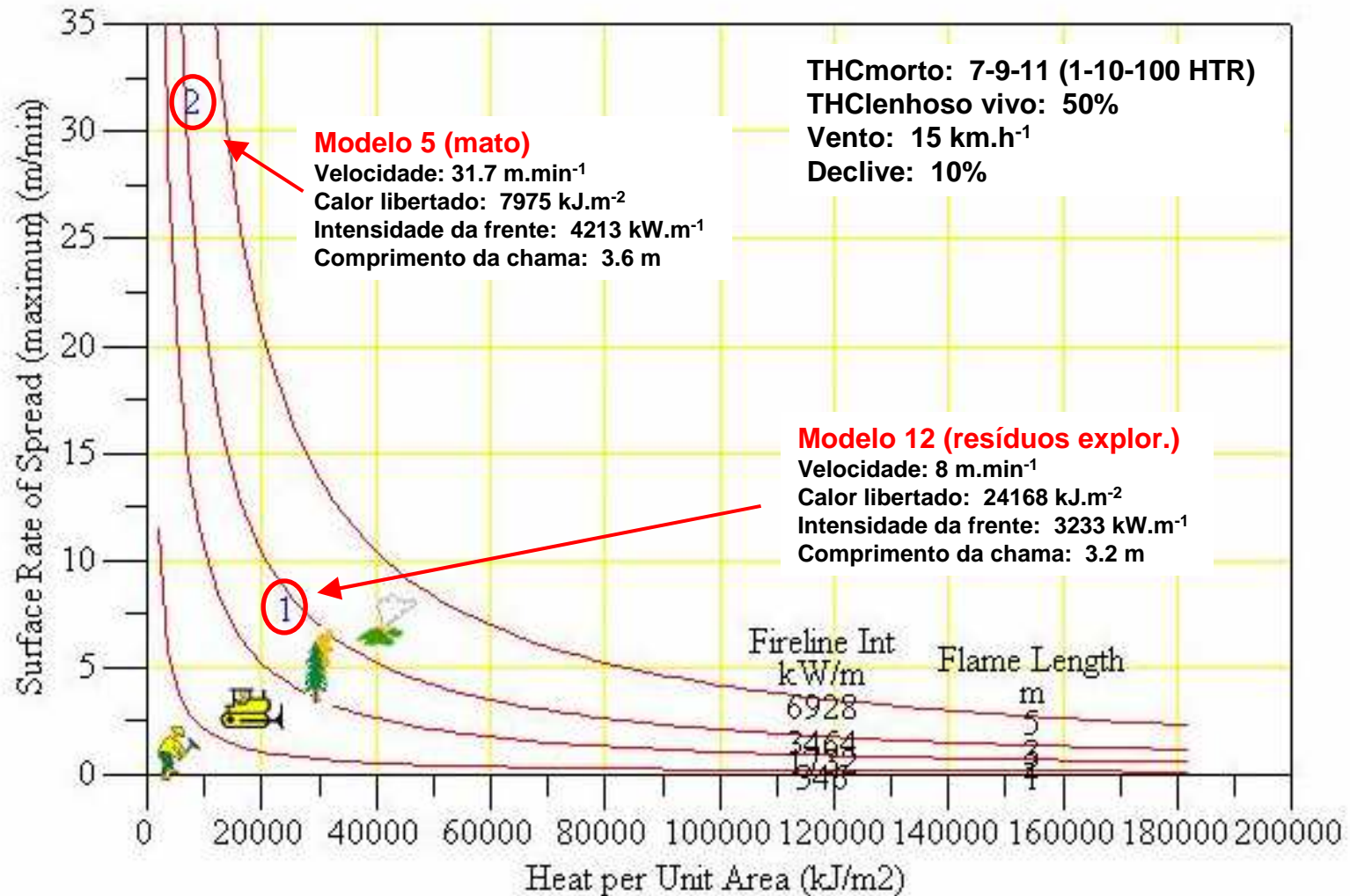
w – combustível consumido (kg.m^{-2})

r – velocidade de propagação (m.s^{-1})

COMPORTAMENTO DO FOGO

- A **curva de características do fogo** exprime a intensidade da frente, I_B , como o produto da quantidade de **calor libertado por unidade de área** com a passagem da frente de chamas, $h.w$ (kJ.m^{-2}), com a sua **velocidade de propagação**, r (m.min^{-1}).
- Os fogos em combustível fino, herbáceo, propagam-se rapidamente e libertam relativamente pouco calor por unidade de área, porque a carga consumida, w , é ligeira. Posicionam-se no quadrante superior esquerdo do gráfico.
- Os fogos em cargas elevadas de combustível grosseiro propagam-se lentamente, mas libertam grande quantidade de calor por unidade de área. Situam-se no quadrante inferior direito do gráfico.
- As isolinhas representam a **intensidade da frente de chamas**. Uma mesma intensidade pode resultar de propagação rápida em combustível fino, ou de propagação lenta em combustível grosseiro.

COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO

Table 2

Fire weather conditions, and observed and predicted fire behavior values associated with the experimental fires

Fire no.	Temp. (°C)	Relative humidity (%)	Open wind speed, 1.8 m (m min ⁻¹)	Rate of spread (m min ⁻¹)		Fuel consumption (kg m ⁻²)		Fire intensity (kW m ⁻¹)	
				Observed	Predicted	Observed	Predicted	Observed	Predicted
1	27.9	51.0	10.9	6.6	5.6	2.4	2.4	6125.7	5380.7
2	27.7	50.0	10.8	4.2	4.5	1.3	1.3	2533.6	2906.8
3	26.9	55.0	11.8	5.5	5.4	1.7	1.7	4130.5	4428.9
4	26.7	52.0	11.3	5.1	5.2	1.7	1.8	3852.1	4154.6
5	26.0	61.0	9.0	5.1	5.3	3.1	3.1	5654.4	5865.2
6	25.7	67.0	6.7	3.1	3.8	2.5	2.6	3110.9	3970.4
7	25.9	65.0	5.8	4.2	2.9	2.6	2.3	3650.0	2487.8
8	26.5	65.0	6.3	3.3	2.9	2.1	1.8	2603.9	2187.2
9	26.5	65.0	6.7	2.4	3.1	2.1	1.8	1913.9	2400.8
10	26.0	65.0	7.4	2.7	2.9	1.6	1.5	1787.6	1644.3
11	29.3	55.0	4.9	2.0	2.0	1.8	1.7	1499.1	1210.4
12	28.4	58.0	2.8	0.8	1.8	2.2	2.3	748.5	1977.5
13	27.3	62.0	7.7	3.1	3.6	1.5	1.6	2522.7	2905.9
14	27.3	62.0	8.1	4.9	3.8	1.8	1.7	3906.2	3095.3
15	27.3	62.0	1.0	0.8	0.3	1.7	1.7	622.8	350.0
16	26.1	65.0	14.8	8.9	8.3	3.2	3.1	10355.3	8955.4
17	24.2	74.0	11.6	6.0	5.3	1.8	1.7	4514.0	4343.7
18	24.2	74.0	9.8	3.1	4.0	1.0	1.3	1878.0	2437.6
19	22.5	77.0	7.2	2.6	3.3	2.1	2.2	2082.6	2570.9
20	22.5	77.0	5.8	5.1	4.6	2.8	4.4	6990.1	6376.9
21	22.5	77.0	4.4	2.8	2.9	2.9	2.8	2990.0	3398.5
22	23.4	71.0	3.9	2.5	2.3	2.6	2.5	2415.3	2469.3
23	23.4	71.0	4.9	2.8	1.7	1.3	1.4	1838.5	477.4
24	25.2	69.0	11.0	4.1	5.2	1.9	1.8	3254.9	4405.1
25	25.8	66.0	7.0	3.6	4.5	2.9	3.1	4142.1	5321.4

min I_B →
Max I_B →

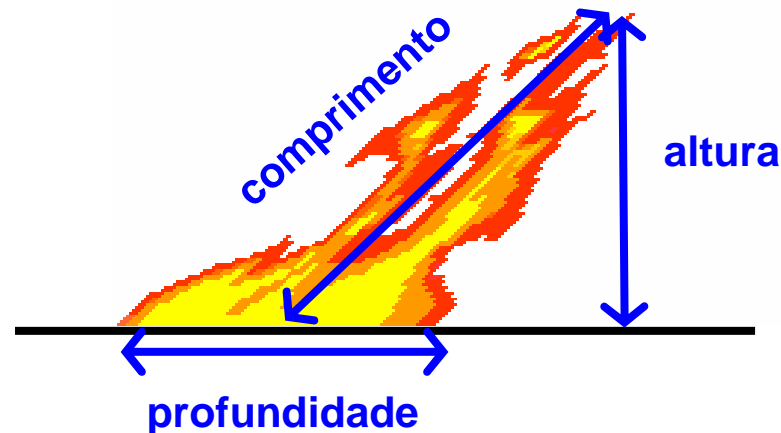
Gama de valores de velocidade de propagação (r), combustível consumido (w) e intensidade da frente de chamas (I_B), em 25 fogos experimentais em matagais na Turquia. (h = 19.000 kJ.kg⁻¹)

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Existe uma relação não-linear entre a intensidade do fogo e o comprimento das chama:





$$L_f = 258.I_B^{2,17}$$

onde I_B é a intensidade da frente de chamas (kW.m^{-1}) e L_f o comprimento da chama (m).



COMPORTAMENTO DO FOGO

- A **dificuldade de contrôle** de uma frente de fogo relaciona-se com a sua intensidade e com o comprimento das chamas:

Intensidade da frente (kW.m ⁻¹)	Comprimento da chama (m)	Interpretação para supressão	
< 350	< 1,2	É possível o ataque à cabeça do fogo, com ferramentas manuais. Linha de contenção manual eficaz.	
350 – 1700	1,2 – 2,4	Demasiado intenso para ataque manual. Autotanques. Bulldozer para abrir linha de contenção.	
1700 – 3450	2,4 – 3,4	Contrôle muito difícil. Podem ocorrer fogos de copas, emissão de fagulhas. Ataque à cabeça provavelmente ineficaz.	
> 3450	> 3,4	Comportamentos extremos. Ataque à cabeça ineficaz. Alguma eficácia do ataque aéreo.	

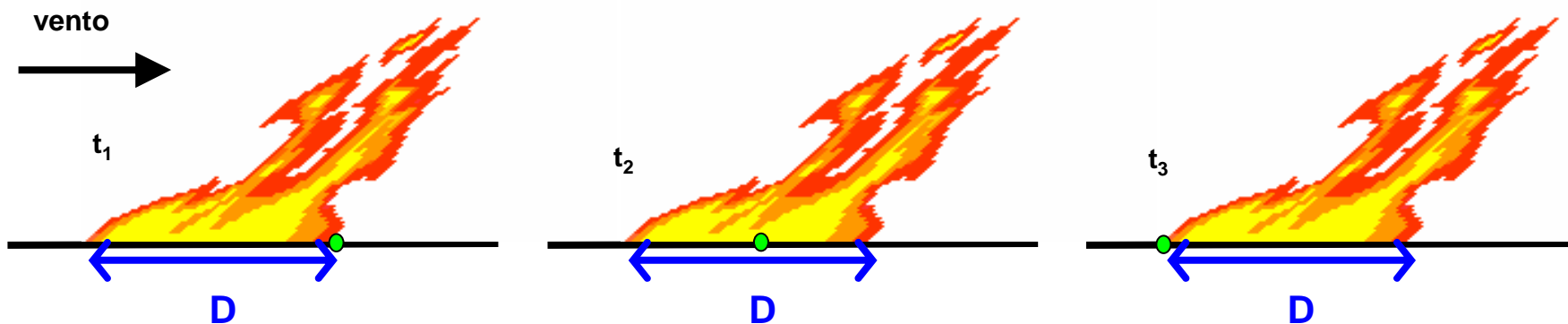
COMPORTAMENTO DO FOGO

- **Tempo de residência da chama**

$$t_r = \frac{D}{r}$$

onde D (m) é a profundidade da chama e r ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) é a velocidade de propagação da frente de chamas.

- O t_r é um factor importante na determinação dos efeitos do fogo sobre os solos e as plantas.



COMPORTAMENTO DO FOGO

- O tempo de residência da chama é função da relação superfície / volume (σ) das partículas do combustível:

$$t_r = \frac{756}{\sigma}$$

com t_r em segundos (s) e σ em cm^{-1} .

- Não confundir t_r com o **tempo de extinção**, t_b que é o tempo necessário para o consumo total das partículas de um leito de combustível.
- O t_b inclui o tempo que uma partícula leva a arder sob combustão com chama, combustão lenta e combustão incandescente. Portanto, t_b é muito mais longo do que t_r .

COMPORTAMENTO DO FOGO

- O tempo de residência da chama também pode ser estimado a partir do diâmetro das partículas de combustível:

$$t_r = 189.D_c$$

onde D_c é o diâmetro da partícula, em cm.

D_c (cm)	t_r (s)	t_r (min)
0 – 0.6	0 - 113	0 – 1'53''
0.6 – 2.5	113 - 473	1'53'' – 7'53''
2.5 – 7.5	473 - 1418	7'53'' – 23'38''
> 7.5	> 1418	> 23'38''

COMPORTAMENTO DO FOGO

- A **modelação do comportamento do fogo** poderá proporcionar uma ajuda preciosa para tarefas como:
 - planeamento da arborização
 - planeamento de infraestruturas de pré-supressão
 - apoio a decisões sobre métodos de ataque, dimensionamento e posicionamento de pessoal e equipamento
 - apoio a decisões sobre evacuação de populações
- Os primeiros esforços de modelação quantitativa do comportamento do fogo datam da década de 1930.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Os principais objectivos da modelação matemática do comportamento do fogo são a estimativa de variáveis como:
 - velocidade de propagação
 - intensidade da frente de chamas
 - taxa de crescimento e alterações da forma do fogo
- Também se procura estimar a probabilidade de emissão de fagulhas, de ateamento de focos secundários e a dispersão de fumos.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Distingue-se uma variedade de modelos, de acordo com
 - **a natureza das equações:**
 - **Modelos teóricos** - Concebidos com base nas leis da mecânica de fluidos, combustão e transferência de calor. Muito difíceis de validar. Extrapoláveis para uma grande gama de situações.
 - **Modelos empíricos** – Baseados em correlações estatísticas criadas a partir de experiências, ou do estudo de casos. Apenas aplicáveis a sistemas com condições idênticas às da sua formulação e teste.
 - **Modelos semi-empíricos** – Construídos a partir de expressões teóricas simples e gerais e complementados por experimentação. Extrapolação adequada para situações semelhantes às da obtenção dos dados experimentais. Menos difíceis de validar do que os modelos teóricos.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Os modelos também se classificam de acordo com
 - as **variáveis estudadas**:
 - **Modelos de propagação do fogo** – Especificam os mecanismos para obter as principais variáveis relacionadas com o avanço do perímetro do fogo. As variáveis mais importantes, que a maioria dos modelos mais completos procura estimar são a velocidade de propagação, a intensidade da frente de chamas e o consumo de combustível.
 - **Modelos das propriedades da frente de chamas** – Descrevem aspectos geométricos da chama, como a sua altura, comprimento, profundidade e ângulo de inclinação.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Finalmente, os modelos podem classificar-se com base
 - no **sistema físico** analisado:
 - **fogo de superfície** – combustíveis superficiais com altura < 2m. Inclui pequenas árvores, arbustos, erva e material morto caído.
 - **fogo de copas** – combustíveis de superfície e estrato aéreo (copado arbóreo). Se a frente de chamas se propaga queimando ambos os estratos, fala-se de fogo de copas activo. Se o fogo consome o combustível de superfície e as copas de árvores individuais, chama-se fogos de copas passivo.
 - **emissão de fagulhas** – partículas de material em combustão transportado pela coluna de convecção e transportadas para além do perímetro principal do fogo.
 - **fogo de solo** – os horizontes orgânicos abaixo da folhada, formados pelas camadas de fermentação e pelo húmus, que se acumulam sobre o solo mineral.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- O modelo mais utilizado foi desenvolvido por Richard Rothermel, em 1972 e está na base da maior parte das aplicações informáticas de previsão do comportamento do fogo, como o Behave, o Farsite e o FlamMap.
- O **modelo de Rothermel** é um modelo **semi-empírico**, de **propagação de fogos de superfície**.
- A sua aplicação pressupõe:
 - continuidade horizontal do combustível
 - uniformidade do combustível
 - altura do combustível $< 2\text{m}$
 - comportamento em regime quase-estacionário
 - comportamento independente do foco de ignição

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Portanto, o modelo de Rothermel não se aplica a:
 - combustão sem chama, lenta ou combustão incandescente
 - fogos de copas
 - emissão de fagulhas e ateamento de focos secundários
 - turbilhões de fogo
 - fogos controlados
- Desenvolvimentos posteriores permitem a modelação em combustíveis com alguma heterogeneidade, bem como o seu uso no apoio ao planeamento de fogos controlados.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- A principal variável estimada pelo modelo de Rothermel é a velocidade de propagação da frente de chamas, r .
- r é modelada como um quociente:

$$r = \frac{\text{fluxo de calor recebido da frente de chamas}}{\text{calor requerido para ignição do combustível potencial}}$$

$$r = \frac{I_p}{E_{ig}}$$

I_p - fluxo de propagação ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

E_{ig} - densidade de energia para ignição de uma unidade de volume do combustível ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$r = \frac{\cancel{\text{kJ}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}}{\cancel{\text{kJ}} \cdot \text{m}^{-3}} = \text{m}^{\cancel{3}} \cdot \cancel{\text{m}}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} = \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$$

COMPORTAMENTO DO FOGO

- O modelo é representado por:

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

onde:

r – velocidade de propagação da frente de chamas (m.min⁻¹)

I_R – intensidade de reacção, a taxa de libertação de calor por unidade de **área** da frente de chamas (kJ.m⁻².min⁻¹)

ξ (csi) – factor de propagação, proporção da intensidade de reacção que aquece à ignição as partículas de combustível adjacentes. Adimensional.

ϕ_w (phi) – coeficiente que representa o efeito intensificador do vento sobre o factor de propagação. Adimensional.

ϕ_s – coeficiente que representa o efeito intensificador do declive sobre o factor de propagação. Adimensional.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

e:

ρ_b (ro) – densidade aparente do leito de combustível ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

ε (epsilon) – coeficiente de efectividade do aquecimento, proporção duma partícula de combustível que aqueceu até à temperatura de ignição quando se inicia a combustão com chama. Adimensional.

Q_{ig} – calor de ignição, quantidade de calor necessária para aquecer uma unidade de volume de combustível ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

■ Intensidade de reacção (I_R)

$$I_R = \Gamma' \cdot \eta_s \cdot \eta_M \cdot w_n \cdot h \quad (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$$

onde:

Γ' (gama) – velocidade de reacção, quantifica a taxa de consumo de combustível (min^{-1}). Corresponde ao quociente entre a eficiência da zona de reacção e o tempo de reacção:

$$\Gamma' = \frac{\eta_\delta}{t_r}$$

η_δ - eficiência da zona de reacção (adimensional)

t_r – tempo de residência da chama (min)

$$\eta_\delta = \frac{w_n - w_r}{w_n}$$

w_n – carga inicial de combustível ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

w_r – carga residual de combustível ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

$$t_r = \frac{D}{r}$$

D – profundidade da chama (m)

r – velocidade de propagação ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

■ Velocidade de reacção (Γ')

$$\Gamma' = \Gamma'_{\max} \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{op}}\right)^A \cdot \exp\left[A \cdot \left(1 - \left(\frac{\beta}{\beta_{op}}\right)\right)\right] \quad (\text{min}^{-1})$$

onde:

Γ'_{\max} – velocidade de reacção máxima, quantifica a taxa de consumo de combustível sem humidade nem minerais (min^{-1}).

β - coeficiente de compactação do combustível (adimensional).

β_{op} - coeficiente de compactação óptima do combustível (adimensional).

A – coeficiente determinado empiricamente, função de σ .

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \epsilon \cdot Q_{ig}}$$

- Velocidade de reacção (Γ')

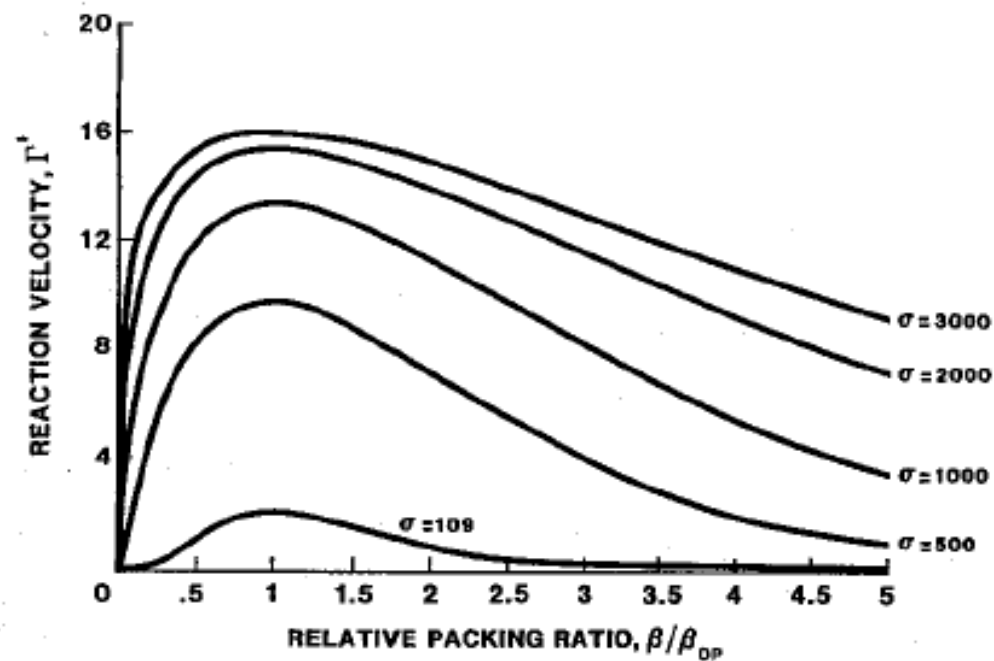


Figure 3—The reaction velocity is at a maximum when the fuel bed density is optimized to provide the best fuel/air ratio. This occurs when the relative packing ratio is 1.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- **Intensidade de reacção** (I_R), cont.

$$I_R = \Gamma' \cdot \eta_s \cdot \eta_M \cdot w_n \cdot h \quad (\text{kJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1})$$

onde:

η_s (eta) – coeficiente de correcção para o teor em minerais.

η_M - coeficiente de correcção para o teor em humidade.

w_n – carga líquida de combustível (kg.m⁻²).

h – conteúdo de calor do combustível (kJ.kg⁻¹).

- A presença de humidade e de minerais reduz a velocidade de reacção abaixo do seu valor potencial.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

■ Factor de propagação (ξ)

$$\xi = \frac{I_{p(0)}}{I_R}$$

onde:

$I_{p(0)}$ – fluxo mínimo de propagação, sem vento nem declive
(kJ.m⁻².min⁻¹).

I_R – intensidade de reacção (kJ.m⁻².min⁻¹).

- Em teoria, ξ pode variar entre 0 e 1. Na realidade, em fogos de vegetação, raramente excederá o valor de 0.2. Ou seja, no máximo, só 20% da energia produzida pela combustão será efectivamente transmitida ao combustível adjacente. O resto perde-se para fora da zona de reacção.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \epsilon \cdot Q_{ig}}$$

Factor de propagação (ξ)

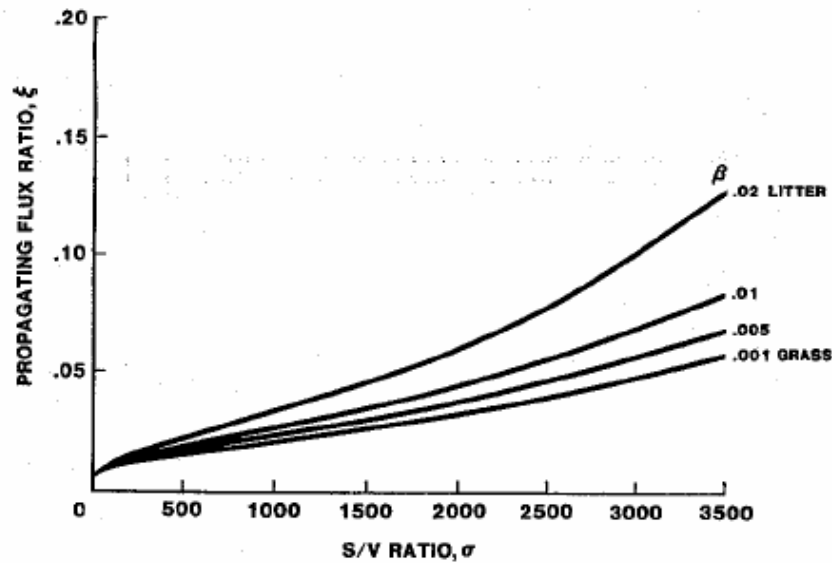


Figure 4—The proportion of heat produced in the combustion zone that actually contributes to fire propagation ranges from 0 to 20 percent, depending on fuel particle size and fuel bed compactness.

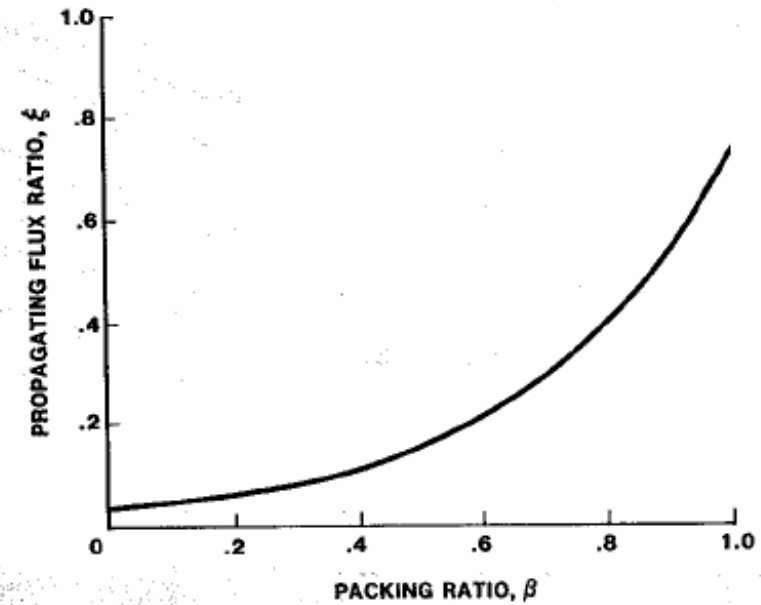


Figure 5—The proportion of heat that contributes to fire propagation increases as the fuel bed becomes more tightly packed. Values above 20 percent are not likely in surface fires.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

■ Coeficiente do vento (ϕ_w)

$$\phi_w = C \cdot U^B \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$$

onde:

U – velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$).

C, B e E – coeficientes empíricos, função de σ .

- O vento inclina as chamas sobre os combustíveis, aumentando muito a eficiência de transmissão de calor aos combustíveis, tanto por radiação como por convecção.
- A velocidade de progressão do fogo não aumenta indefinidamente com a velocidade do vento, estabilizando a $\approx 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Daqui para cima, a convecção forçada domina completamente a convecção natural induzida pelo fogo e remove rapidamente o ar aquecido para fora da zona de reacção.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \epsilon \cdot Q_{ig}}$$

■ Coeficiente do vento (ϕ_w)

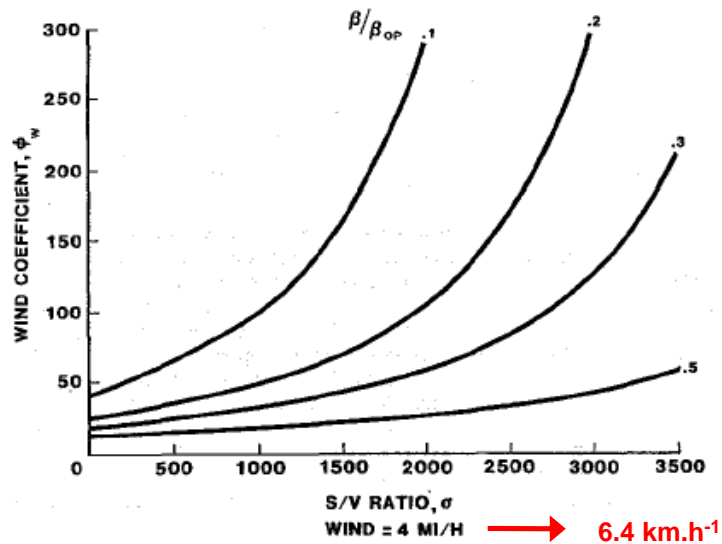


Figure 1—The wind coefficient increases as the surface-area-to-volume ratio of the fuels increases, and the effect becomes greater as the fuel bed density decreases.

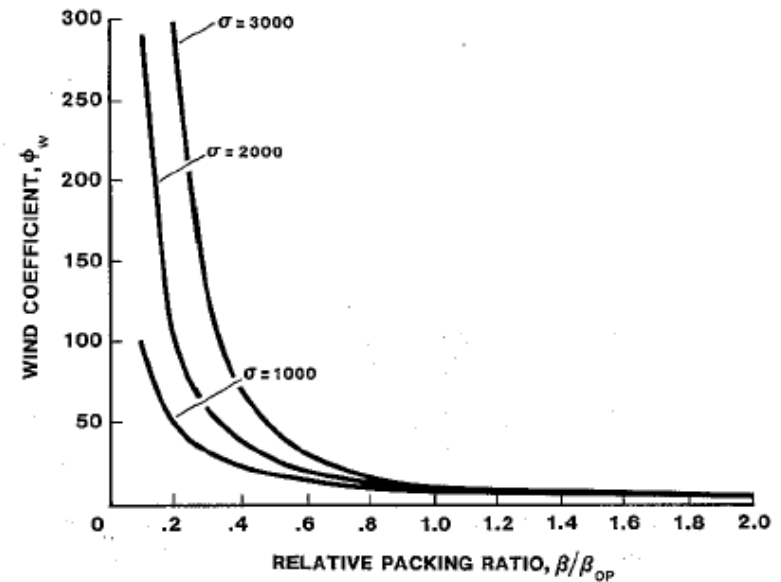


Figure 2—The wind coefficient decreases rapidly as the fuel bed density increases.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- **Coeficiente do declive (ϕ_s)**

$$\phi_s = 5,275 \cdot \beta^{-0.3} \cdot (\tan \phi)^2$$

onde:

β – coeficiente de compactação do combustível.

ϕ - declive do terreno (%)

- O declive também inclina as chamas sobre os combustíveis, mas aumenta menos a eficiência de transmissão de calor do que o vento.
- O modelo de Rothermel trata os efeitos do vento e do declivo como sendo independentes, o que é um pressuposto simplificador pouco realista.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- coeficiente de efectividade do aquecimento (ε)

$$\varepsilon = \exp\left(\frac{-4,528}{\sigma}\right)$$

onde:

σ - relação superfície volume das partículas de combustível (cm^{-1}).

- Quando uma partícula de combustível grosseiro entra em ignição, o seu interior pode estar relativamente frio. Apenas uma camada superficial aqueceu até à ignição.
- O produto $\rho_b \cdot \varepsilon$ mede a carga de combustível por unidade de volume que é aquecida até à temperatura de ignição, ou seja, quantifica a quantidade de combustível no poço de calor.

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- **calor de ignição (Q_{ig})**
- Mede a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa do combustível húmido, desde a temperatura ambiente até à temperatura de ignição.

$$Q_{ig} = C_{cs} \cdot (T_{ig} - T_{eb}) + M_f [C_a \cdot (T_{eb} - T_{amb}) + L_v]$$

onde:

C_{cs} – calor específico do combustível seco

T_{ig} , T_{eb} , T_{amb} – temperaturas de ignição, ebulição da água e ambiente

M_f – teor de humidade do combustível

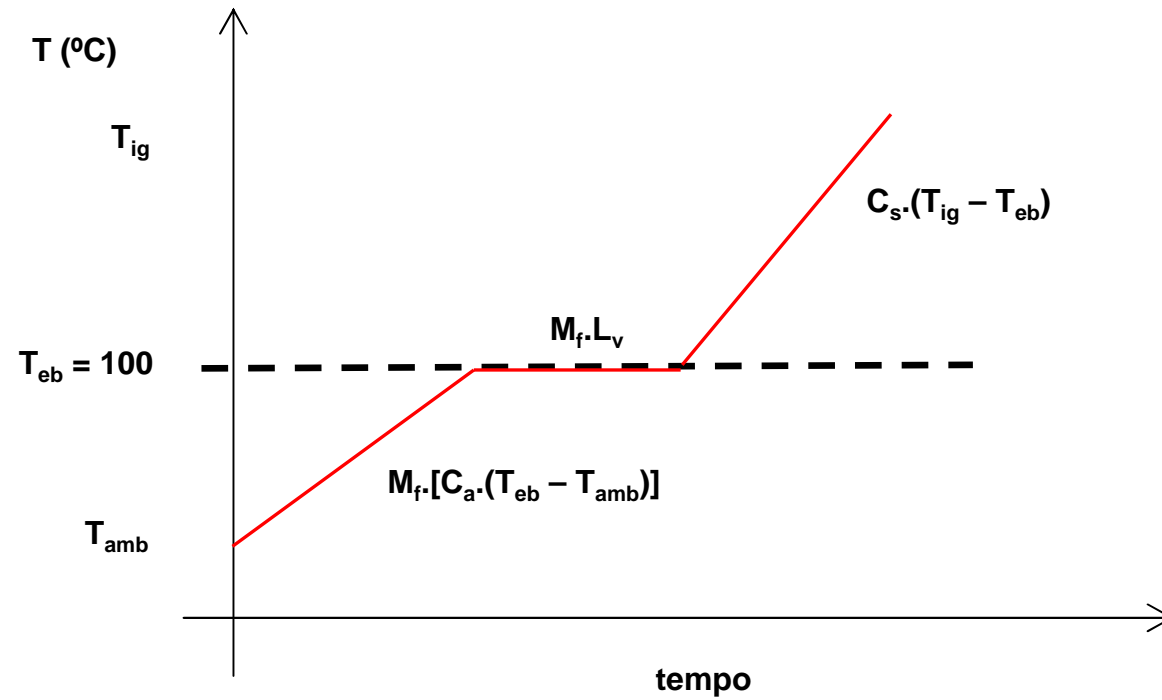
C_a – calor específico da água

L_v – calor latente de vaporização da água

COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- calor de ignição (Q_{ig})



COMPORTAMENTO DO FOGO

$$r = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}$$

- calor de ignição (Q_{ig})
- Sendo C_{cs} , C_a e L_v constantes, se assumirmos:

$$T_{amb} = 20^\circ \text{ C}$$

$$T_{eb} = 100^\circ \text{ C}$$

$$T_{ig} = 320^\circ \text{ C}$$

então Q_{ig} será exclusivamente função do teor de humidade do combustível, M_f (%):

$$Q_{ig} = 581 + 2594 \cdot M_f$$

- O produto $\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}$ será, então, a quantidade total de energia necessária para aquecer o leito de combustível até à temperatura de ignição.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Avaliaram-se diversos modelos de velocidade de propagação, para fogos de Inverno e Primavera, num estudo sobre uso de fogo controlado para redução de combustíveis, em França.
- Os fogos experimentais foram feitos em matagais de *Genista purgans*. A vegetação tinha altura variável entre 0,5m e 2m e % de coberto do solo $\geq 80\%$.

■ Modelos usados:

- **Canadian Forest Fire Behavior Prediction System:** $r = a * [1 - e^{-(b*ISI)}]^c$

ISI é o Initial Spread Index, do FWI. **a**, **b** e **c** são coeficientes empíricos, função do tipo de combustível.

- **Modelo de Rothermel:** $r = I_p / (\rho_b \varepsilon * Q_{ig})$

I_p é o fluxo propagado ($W.m^{-2}$), ρ_b a densidade aparente ($kg.m^{-3}$), ε o coef. de efectividade do aquecimento e Q_{ig} é o calor de ignição ($kJ.kg^{-1}$).

COMPORTAMENTO DO FOGO

- **Modelo de Drouet:** $r = 180 \cdot \exp(T \cdot 0.06) \cdot T_{gh} \left[\frac{100 - Res}{150} \right] \cdot [1 + 2 \cdot [0.8483 + T_{gh}(V/30 - 1.25)]]$

T é a temperatura do ar (°C), **V** é a velocidade do vento (km.h⁻¹), **Res** é um índice de humidade do solo e **Tgh** é a tangente hiperbólica.

- **Modelos de Trabaud:** $r = 0.066 \cdot U_v^{0.439} \cdot H^{0.345}$; $r = 5.72 \cdot U_v^{0.400} \cdot H^{0.352} / T_{ev}^{1.12}$

U_v é a velocidade do vento (cm.s⁻¹), **H** a altura da vegetação (cm) e **T_{ev}** é o teor de humidade da vegetação (em % biomassa verde).

- **Modelo de Valabre:** $r = 0.03 \cdot U$, onde **U** é a velocidade do vento.

- **Modelo F.LO.RA.C.:** baseia-se em “cluster analysis”, para induzir regras que relacionam gamas de valores de declive, altura da vegetação, temperatura, humidade relativa e velocidade do vento, com uma gama de valores de velocidade de propagação.

COMPORTAMENTO DO FOGO

Table 1. General description of plots and fuels
n.d., not determined

	StJ	PrR	PrT	Experiment		Po	Rou	PrM	
				ViB	Pre-1				Pre-2
<i>Plot description</i>									
Elevation (m)	760	1035	1016	775	690	690	815	1270	1035
Slope (%)	40	25	20	10	40	40	25	10	30
Aspect	N NW	E	NW	S SE	W SW	W SW	W	SW	E
<i>Fuel characteristics</i>									
Height (cm)	200	50	50	70	150	150	130	120	80
Live fuel moisture content (%)	57.8	49.7	49.9	46.5	53	53	48.1	49.5	50.7
Dead fuel (on foot) moisture content (%)	15.4	13.2	10.6	6	18.5	18.5	11.1	13.9	8.3
Litter moisture content (%)	n.d.	38	26	33	28.2	28.2	31.1	53.6	26.6

Table 2. Meteorological conditions during the Lozère experiments

	StJ	PrR	PrT	Experiment		Po	Rou	PrM	
				ViB	Pre-1				Pre-2
<i>Wind</i>									
Average windspeed (m s^{-1})	1.5	6.2	5	0.88	0.86	0.1	1.5	0.3	2.1
Max. windspeed (m s^{-1})	3.3	9.3	6.8	2.9	1.8	0	2.4	2.4	2.6
Windspeed direction	W NW	N NE	N NE	SW	SE	S SE	SW	SW	SE
<i>Temperature ($^{\circ}\text{C}$)</i>									
	14.3	3.6	1.6	19.6	4.6	8.1	13.5	10.5	13.5
<i>Relative humidity (%)</i>									
	44	34	30	20	76	75	40	36	36

COMPORTAMENTO DO FOGO

Table 3. Observed and predicted rate of spread during the Lozère experiments

	StJ	PrR	PrT	ViB	Experiment Model				
					Pre-1	Pre-2	Po	Rou	PrM
<i>Observed rate of spread (m h⁻¹)</i>									
	90	150	600	235	0	240	218	50	360
<i>Predicted rate of spread (m h⁻¹)</i>									
BEHAVE (FM 4)	360	1220	2160	260	140	300	360	100	520
Canadian FBPS (S-2)	37	69	212	81	309	296	139	309	327
Drouet	167	138	108	218	89	103	159	121	167
Trabaud (1)	144	144	144	72	108	36	108	72	108
Trabaud (2)	108	144	108	72	72	36	108	72	108
Valabre	162	670	540	95	93	11	162	32	227
FLORAC	89	150	600	235	238	57	263	26	242

Table 5. Model evaluation results for Pyrénées Orientales experiments

Model	<u>Predicted</u>	FB	NMSE	MG	VG
	Observed				
Drouet	0.636	1.234	2.459	4.222	7.961
Trabaud (1)	0.519	1.313	3.564	5.378	16.949
Trabaud (2)	0.514	1.365	3.491	5.302	16.164
Canadian FBPS (S-2)	3.35	0.01	0	1.01	1
BEHAVE (FM 4)	3.18	-0.521	0.291	0.587	1.329
Valabre	0.996	0.736	0.627	2.165	1.816
FLORAC	1.67	-0.047	0.002	0.954	1.002

Table 4. Model evaluation results for the Lozère experiments

Model	<u>Predicted</u>	FB	NMSE	MG	VG
	Observed				
Drouet	0.902	0.563	0.344	1.783	1.397
Trabaud (1)	0.62	0.855	0.894	2.493	2.303
Trabaud (2)	0.576	0.917	1.064	2.692	2.667
Canadian FBPS (S-2)	0.665	0.269	0.074	1.311	1.076
BEHAVE (FM 4)	2.9	-0.944	1.148	0.358	2.865
Valabre	1.092	-0.15	0.023	0.86	1.023
FLORAC	0.82	0.022	0	1.023	1

COMPORTAMENTO DO FOGO

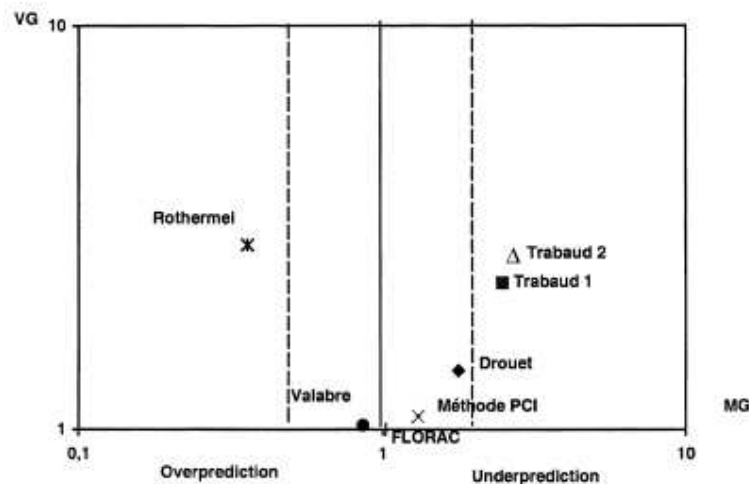


Fig. 4. Model performance measure, based on the representation of VG and MG indexes (Lozère experiments).

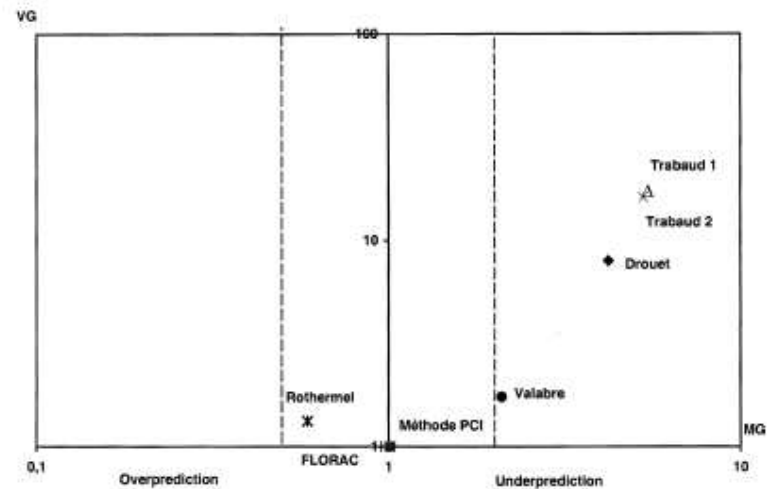


Fig. 5. Model performance measure, based on the representation of VG and MG indexes (Pyrénées-Orientales experiments).

- Validação com o enviesamento geométrico médio e com a variância geométrica. Um modelo óptimo produz $MG = 1$ e $VG = 1$.
- Há 3 modelos que produzem resultados muito bons (Canadian FBPS, modelo Valabre model, e F.LO.RA.C.).
- Valabre é extremamente simples e F.LO.RA.C é puramente estatístico.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- 29 fogos experimentais em matagais em Portugal, em terreno plano (declive $\leq 5\%$).

- 4 tipos de combustível:
 - mato alto de tojo (*Ulex europaeus*)
 - mato baixo de urze (*Erica umbellata*) e carqueja (*Chamaespartium tridentatum*)
 - mato médio de urze (*Erica australis*) e carqueja (*Chamaespartium tridentatum*)
 - mato alto de urze (*Erica arborea*), tojo (*Ulex parviflorus*) e esteva (*Cistus ladanifer*)

COMPORTAMENTO DO FOGO

Table 2
Range of values for each fuel variable^a

	cov. (%)	<i>h</i> (m)	W_f (t ha ⁻¹)	W_t (t ha ⁻¹)	% Fine	ρ_{pf} (kg m ⁻³)	ρ_{pt} (kg m ⁻³)
Average	84	0.7	14.6	19.8	82	2.7	2.3
Minimum	50	0.2	4.8	4.9	56	1.6	3.4
Maximum	95	1.9	36.6	64.9	99	3.5	5.0

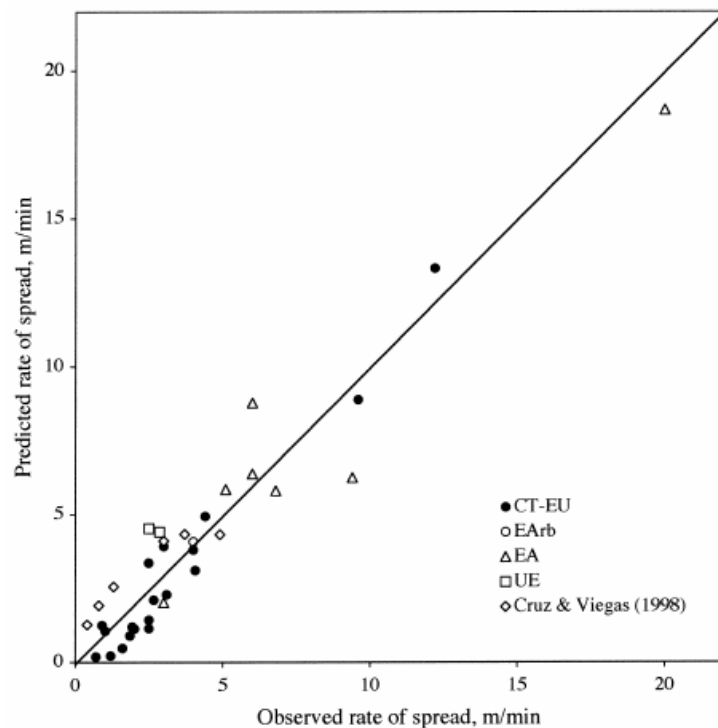
^a cov.: vegetation cover; *h*: vegetation height; W_f : elevated fine (<6 mm) fuel load; W_t : elevated total fuel load; ρ_{pf} : fine fuel bulk density; ρ_{pt} : total fuel bulk density.

Table 1
Range of values for rate of fire spread, weather and fuel moisture variables^a

	<i>R</i> (m min ⁻¹)	<i>U</i> (km h ⁻¹)	<i>T</i> (°C)	RH (%)	M_d (%)	M_l (%)	<i>S</i> (%)
Average	4.4	9	14	53	21	85	1
Minimum	0.7	1	6	30	10	72	0
Maximum	20.0	27	22	93	40	113	5

^a *R*: rate of fire spread; *U*: surface wind speed at 2 m height; *T*: air temperature; RH: air relative humidity; M_d : fine (<6 mm) dead fuel moisture content; M_l : fine live fuel moisture content; *S*: slope steepness.

COMPORTAMENTO DO FOGO

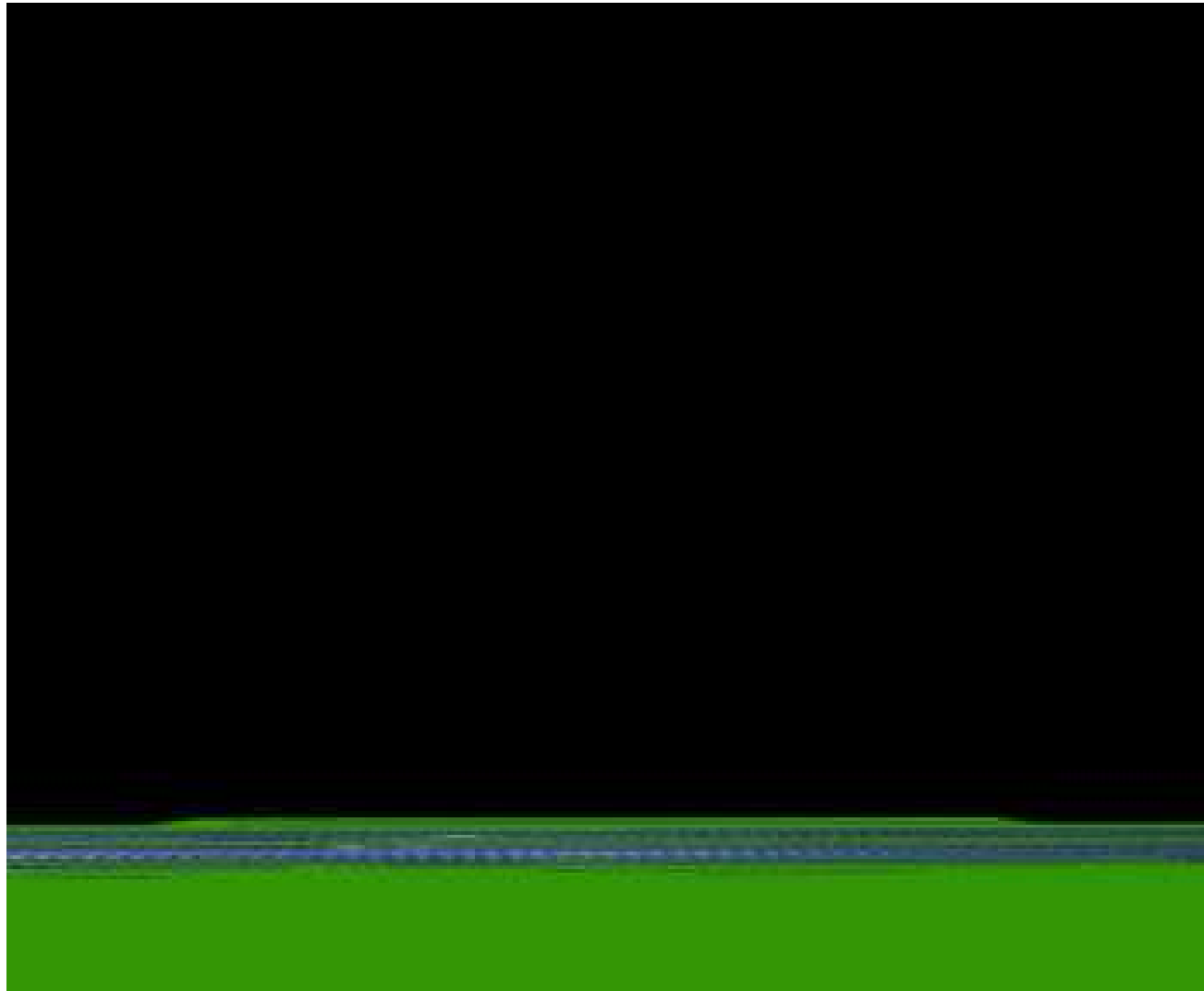


- Modelo para uso em fogo controlado.
- Não considera o efeito do declive.
- Desenvolvido com um n^o limitado de fogos experimentais.

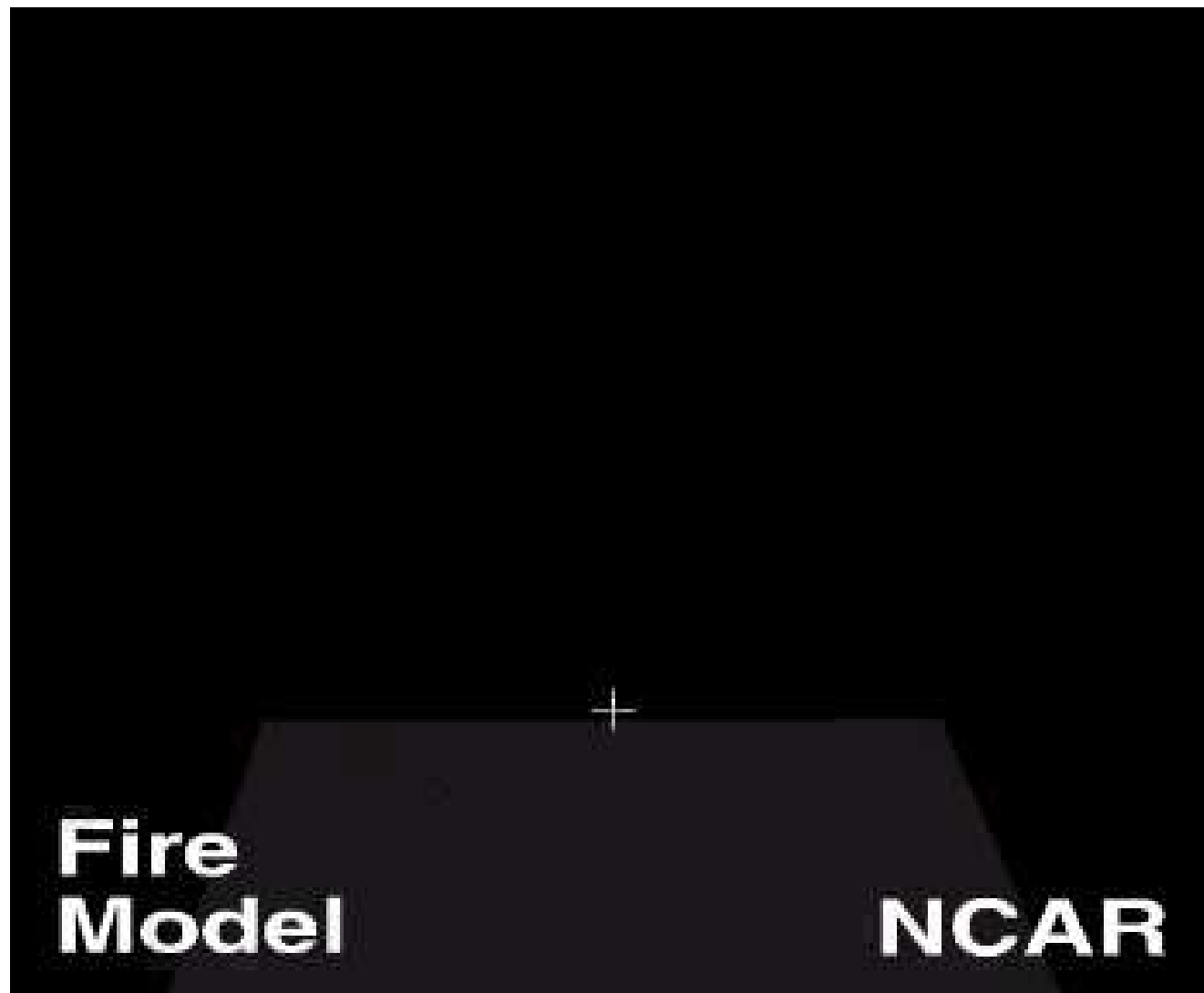
■ Velocidade de propagação prevista vs observada, para um modelo com a velocidade do vento (U), TH combustível morto (M_d) e altura da vegetação (h), com os tipos de combustível individualizados.

■ $r = 7,255 \cdot \exp(0,092U) \cdot \exp(-0,067M_d) \cdot h^{0.932}$.

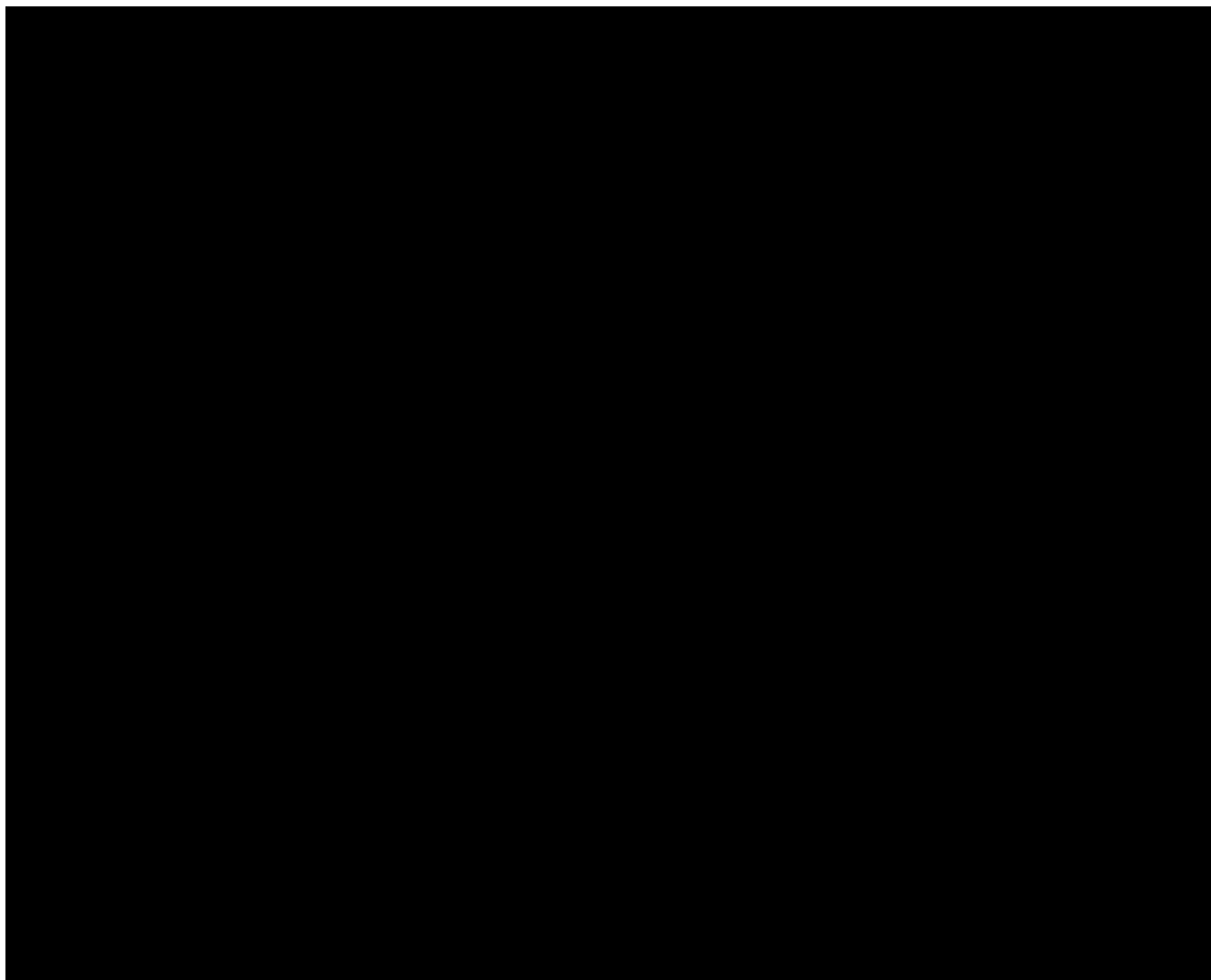
COMPORTAMENTO DO FOGO



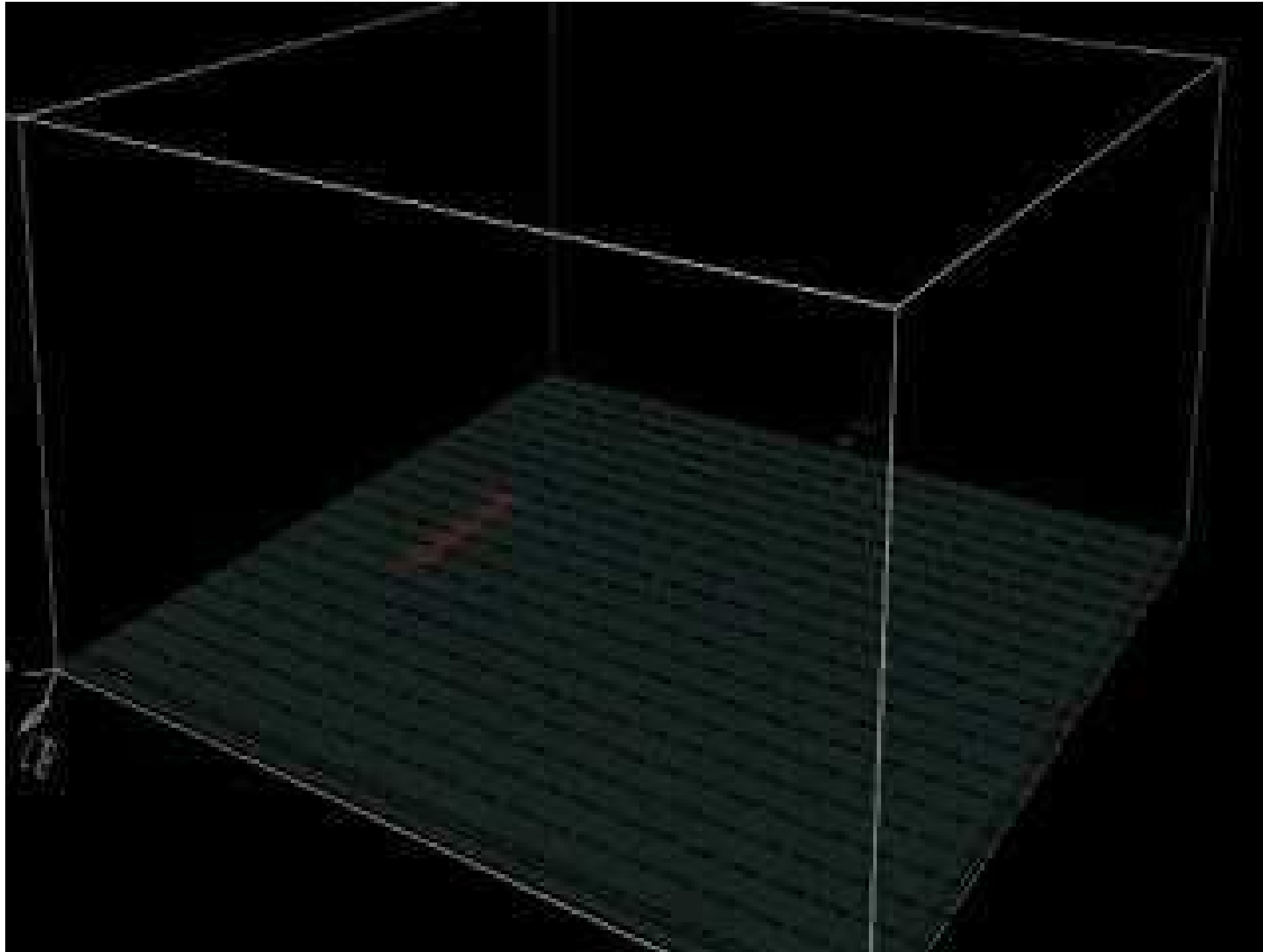
COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO

- Os **fogos de copas** são intensos, propagam-se rapidamente e têm efeitos destrutivos. O seu potencial para causar danos é sempre elevado.
- A avaliação do risco resume-se, portanto, à estimativa da sua probabilidade de ocorrência, i.e. à identificação das situações físicas que os facilitam.
- A ocorrência de fogos de copas depende sempre da conjugação de condições adequadas quanto a combustíveis, meteorologia e topografia, que favoreçam a sua formação e propagação sustentada.
- As metodologias de avaliação da probabilidade de ocorrência de fogo de copas baseia-se na determinação de condições ambientais críticas, que conduzem a diferentes tipos de comportamento do fogo nos copados florestais.

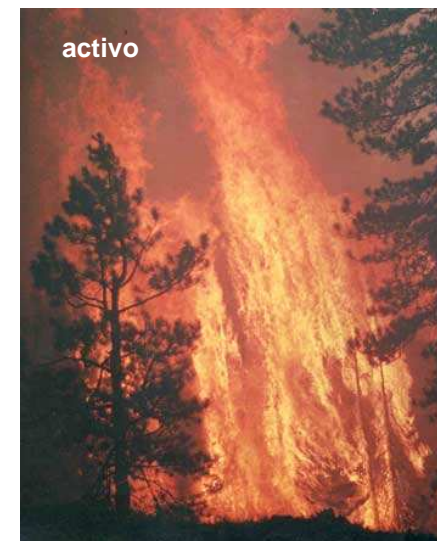
COMPORTAMENTO DO FOGO

- A modelação de fogos de copas é complexa e está relativamente menos desenvolvida que a dos fogos em regime quase-estacionário.
- A modelação trata **2 questões básicas**:
 - condições de **transição para o copado**, de um fogo superficial
 - **propagação através das copas**
- van Wagner estabeleceu critérios quantitativos para:
 - previsão de formação de tochas por fogo de superfície
 - transição para combustão contínua através do copado
 - emergência de fogo de copas independente

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Num **fogo de copas passivo**: incendeiam-se árvores individuais, ou pequenos grupos de árvores, mas não se mantém uma frente de chamas, densa e consistente, no copado.
- Num **fogo de copas activo**, está envolvido todo o complexo de combustível, desde a superfície até ao copado. Porém, o fogo nas copas continua a depender do calor fornecido pelo fogo de superfície para a sua propagação. Estes fogos caracterizam-se pela presença de uma frente de chamas contínua, desde o combustível superficial até ao topo do copado.
- Um **fogo de copas independente** arde através do copado, sem suporte de um fogo de superfície. É um fenómeno raro e de curta duração, que exige uma combinação de declive acentuado, vento muito forte e grande secura foliar do copado.

COMPORTAMENTO DO FOGO



COMPORTAMENTO DO FOGO

- Um fogo de copas consome combustíveis do copado, incluindo folhagem viva e morta, líquenes e ramos finos, vivos e mortos. Estes combustíveis tendem a ser mais húmidos e menos densos ($< \rho_b$) do que os de superfície.
- As três características quantitativas fundamentais dos combustíveis aéreos são a **densidade aparente do copado** (ρ_b), a **altura da base do copado** (CBH) e o **teor de humidade foliar**. A ρ_b refere-se ao povoamento e não a uma árvore individual.
- A CBH é mais difícil de definir, mas também é uma propriedade do povoamento. Em termos das suas implicações para o início de fogos de copas, a CBH, é a menor altura acima do solo à qual existe suficiente combustível aéreo para propagar o fogo na vertical, através do copado.

COMPORTAMENTO DO FOGO

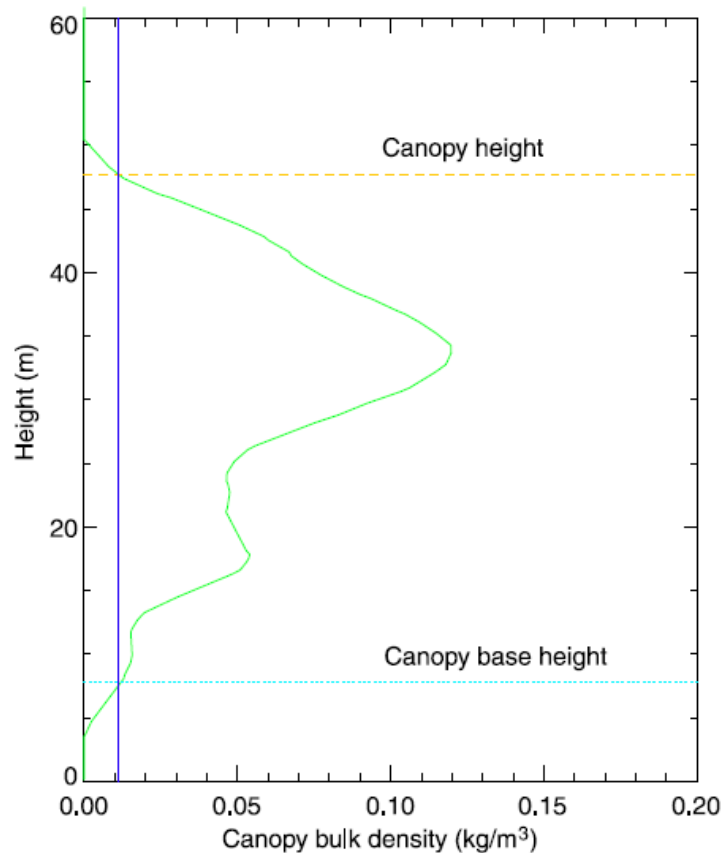


Fig. 2. Estimation of fuel parameters at inventory plot within dense, mature Douglas-fir canopy unit, Capitol Forest study area.

- Esta definição considera combustíveis “escada”, tais como líquenes, trepadeiras, ramos mortos e regeneração arbórea.
- A CBH quantifica-se como a menor altura acima da qual existem pelo menos **0.011 kg.m⁻³** de combustível aéreo disponível.

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Os **critérios de transição** entre tipos de fogo de copas definem-se em função da **intensidade da frente de chamas** e da **velocidade de propagação**:

$$I_0 = (C.h.CBH)^{1,5} = [0,01.(460 + 25,9H_c).CBH]^{1,5}$$

onde,

I_0 – intensidade frontal crítica para ascensão do fogo de superfície ao copado (kW.m^{-1})

C – constante empírica

h – calor de ignição das copas (kJ.kg^{-1})

H_c – teor de humidade das folhas das copas (%)

CBH – altura da base da copa (m)

COMPORTAMENTO DO FOGO

- Para a **velocidade de propagação**:

$$V_0 = \frac{S_0}{\rho_b} = \frac{0,05}{\rho_b}$$

$S_0 = 0,05$ com base em dados empíricos

onde,

V_0 – velocidade de propagação crítica do fogo de superfície, para propagação contínua através do copado (m.s^{-1})

S_0 – taxa crítica de fluxo de massa mínimo ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

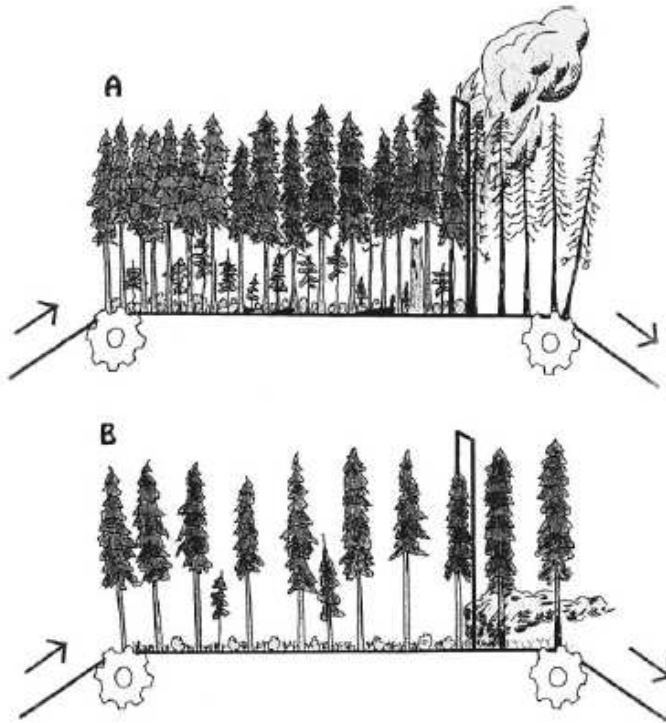
ρ_b – densidade aparente das copas (kg.m^{-3})

Se:

$I > I_0$ e $V < V_0 \Rightarrow$ fogo de copas **passivo**

$I > I_0$ e $V > V_0 \Rightarrow$ fogo de copas **activo**

COMPORTAMENTO DO FOGO



- A **taxa de fluxo de massa** é a taxa de consumo de combustível ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) através de um plano vertical (orientado paralelamente à frente de chamas), no interior do leito de combustível. É o produto da velocidade de propagação, r ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), pela densidade aparente do combustível, ρ_b ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).
- As condições críticas para a taxa de fluxo de massa podem imaginar-se como uma floresta num tapete rolante, a passar por uma frente de chamas estacionária.

- **A)** com condições meteorológicas severas e r elevada, a massa do copado passa rapidamente pela parede de chamas, excede o valor crítico de taxa de fluxo de massa e ocorre fogo de copas.
- **B)** Se a ρ_b do copado é mais baixa, para a mesma r , não se atinge o valor crítico de taxa de fluxo de massa e o fogo permanece apenas à superfície. Uma menor r nas copas (i.e., vento mais fraco) pode ter este mesmo resultado.

COMPORTAMENTO DO FOGO

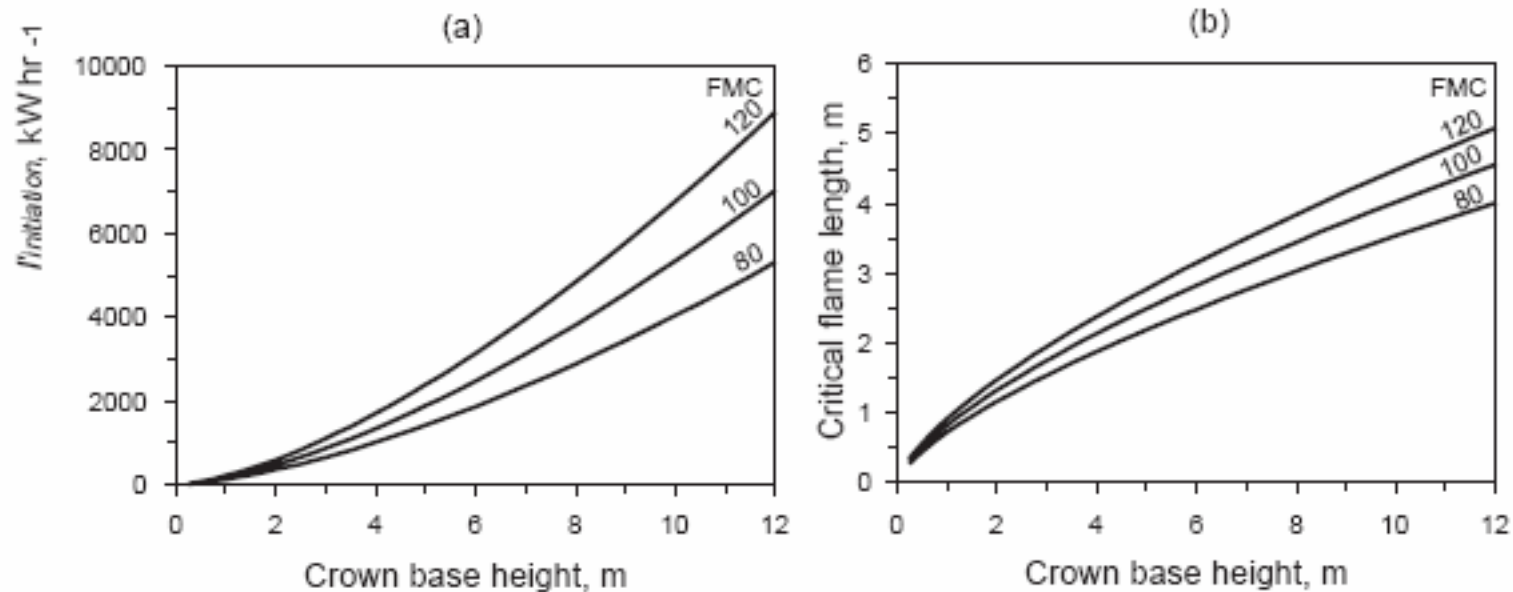


Figure 4—Van Wagner’s crown fire initiation criterion (following Alexander 1988) expressed as critical surface fireline intensity (a), and critical flame length using Byram’s (1959) flame length model (b). Note that critical flame length is less than canopy base height (CBH) for CBH greater than about 1 m. **Example:** a stand with CBH of 3 m and 100 percent FMC requires surface fireline intensity of 875 kW m⁻¹ (flame length 1.7 m) to initiate crowning.

COMPORTAMENTO DO FOGO

O teor de humidade foliar (FMC) tem menos influência sobre o início dos fogos de copas do que a CBH mas, em princípio, o seu efeito sobre a velocidade de propagação do fogo através das copas é muito maior.

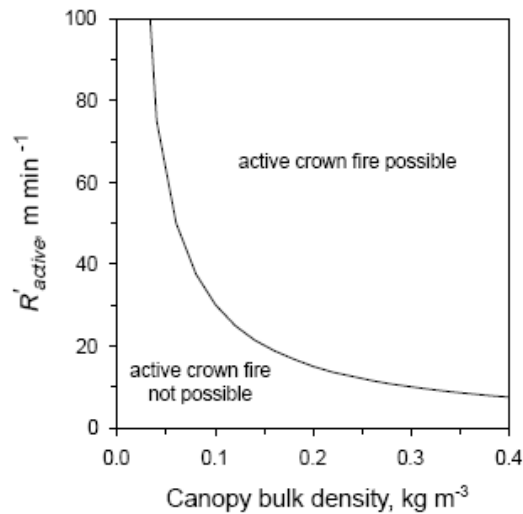


Figure 5—Van Wagner's criterion for sustained active crown fire spread based on a minimum horizontal mass-flow rate of $0.05 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Example: a stand with CBD of 0.2 kg m^{-3} requires a spread rate of 15.0 m min^{-1} to sustain active crowning.

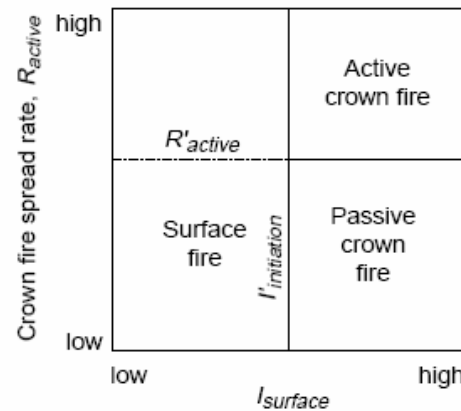


Figure 6—Fire classification based on Van Wagner (1977) and Alexander (1988). A fire for which surface fire intensity (I_{surface}) is less than critical ($I'_{\text{initiation}}$) falls in the surface fire class; one for which I_{surface} exceeds $I'_{\text{initiation}}$ is either a passive or active crown fire depending on the crown fire spread rate criterion. Passive crowning occurs where a crown fire initiates ($I_{\text{surface}} > I'_{\text{initiation}}$) but cannot be sustained ($R_{\text{active}} < R'_{\text{active}}$). An active crown fire occurs where both criteria are exceeded.

COMPORTAMENTO DO FOGO

Table 3—Simulation inputs for a hypothetical stand to be used in examples throughout this paper.

Input	Value
Fuel model	10 (timber litter)
Slope	0 percent
Canopy bulk density	0.15 kg m ⁻³
Canopy base height	1.5 m
Foliar moisture content	100 percent
Wind reduction factor	0.15
Live fuel moisture	Normal summer ^a

^a See table 4 for a listing of fuel moisture content by size class.

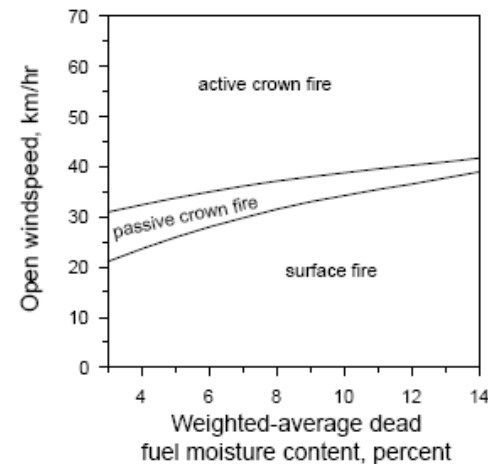


Figure 7—Van Wagner's (1977) crown fire classification under varying open windspeed and dead surface fuel moisture conditions for the example stand. For this example, a passive crown fire region separates surface fire and active crown fire. **Inputs:** fuel model 10 (timber litter and understory, Anderson 1982), canopy base height = 1.5 m, canopy bulk density = 0.15 kg m⁻³, foliar moisture content = 100 percent, live surface fuel moisture = 78 percent, and wind reduction factor = 0.15.

COMPORTAMENTO DO FOGO

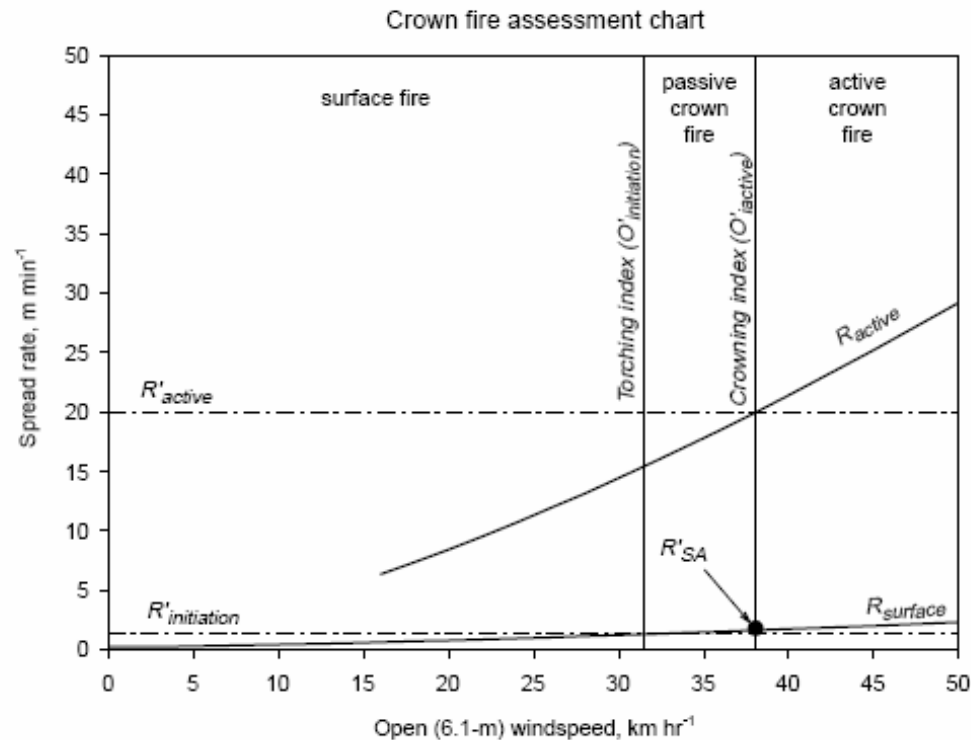


Figure 8—The Torching and Crowning Indices can be determined graphically on a crown fire assessment chart. The open windspeed at which $R_{surface}$ exceeds $R'_{initiation}$ (same as $l_{surface} > l'_{initiation}$) is the Torching Index (TI). The open windspeed at which R_{active} exceeds R'_{active} is the Crowning Index. A surface fire is expected at windspeeds below TI. Windspeeds greater than TI but less than CI lead to passive crowning. Active crown fire is expected at windspeeds above CI. The theoretical surface fire spread at CI (R'_{SA}) is shown; that quantity will be used later in the paper. **Inputs:** fuel model 10 (timber litter and understory, Anderson 1982), canopy base height = 1.5 m, canopy bulk density = 0.15 kg m⁻³, foliar moisture content = 100 percent, normal summer surface fuel moisture condition (Rothermel 1991, table 4), and wind reduction factor = 0.15.

COMPORTAMENTO DO FOGO

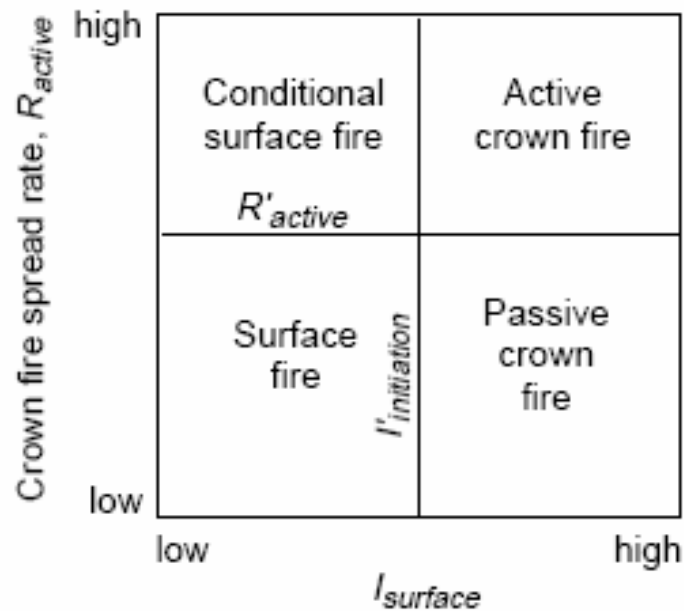


Figure 12—Extension of Van Wagner’s (1977) original classification to include conditional surface fire. Cases in which *CBD* is sufficient to support active crowning but surface fire intensity (from Rothermel’s surface fire model) is below the threshold for initiation fall into the conditional surface fire class. Within this class, the type of fire observed depends on the origin of the fire in the subject stand; surface fires are expected to remain on the surface, and active crown fires remain fully active.

COMPORTAMENTO DO FOGO

The process of crown fire cessation has not yet been studied on its own. However, Van Wagner's two criteria for crown fire initiation can be modified and applied to cessation. There are again two criteria to check; failure to meet either one will lead to crown fire cessation.

Mass-Flow Rate too Low—The mass-flow rate through the canopy must be at least $3.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, which leads to a critical spread rate (**equation 14**). If the product of the potential active crown fire spread rate and canopy bulk density does not meet this threshold, then active crowning is not possible and active crowning ceases. Cessation from failure to meet the mass-flow requirement is quantified by the Crowning Index. If the wind speed falls below CI then an active crown fire could be expected to cease.

Intensity in Surface Fuels too Low—The after-crowning contribution of surface fuels to fireline intensity must be sufficient to meet the threshold for initiation (**equation 11**). If the product of R_{active} and $HPA_{surface}$ falls below the threshold for crown fire initiation, we assume that the crown fire could not continue.

Using the criterion in this way implies that crown fire spread can be modeled as a series of crown fire initiations, similar in concept to assumptions made for surface fire spread (Rothermel 1972). It is not known whether this mechanism is realistic for crown fires.

COMPORTAMENTO DO FOGO

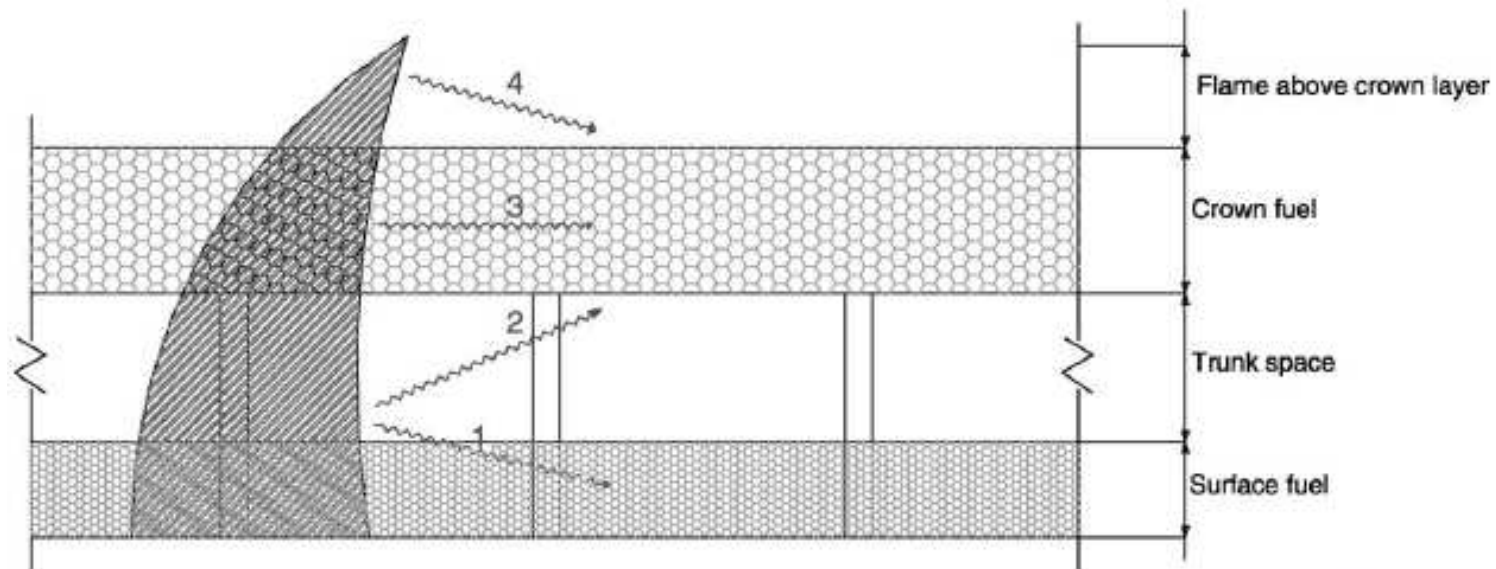


Fig. 2. Simplified representation of the radiation emitted from a crown fire front. (From Van Wagner [66].)

COMPORTAMENTO DO FOGO

Fig. 4. Typical crown fire behavior during the ICFME experimental fires (a) Plot A, (b) Plot 4, (c) Plot 9, and (d) a typical postburn in-stand view.

