



# Combustibles forestales

2008

<http://www.etsea2.udl.es/~UFF/>  
[dmolina@pvof.udl.es](mailto:dmolina@pvof.udl.es)

Domingo Molina, PhD at University of California, Berkeley  
Unit of Forest Fires – University of Lleida, SPAIN





# TEMAS

- ▶ • Física de la combustión
- ▶ • combustible forestal
- ▶ • inflamabilidad / MODELOS DE COMBUSTIBLES / propagación
- ▶ • comportamiento del fuego
  - R, L, I, Ir, Qr -
  - Behave
  - Nexus
  - Farsite
  - Campbell Prediction System Language

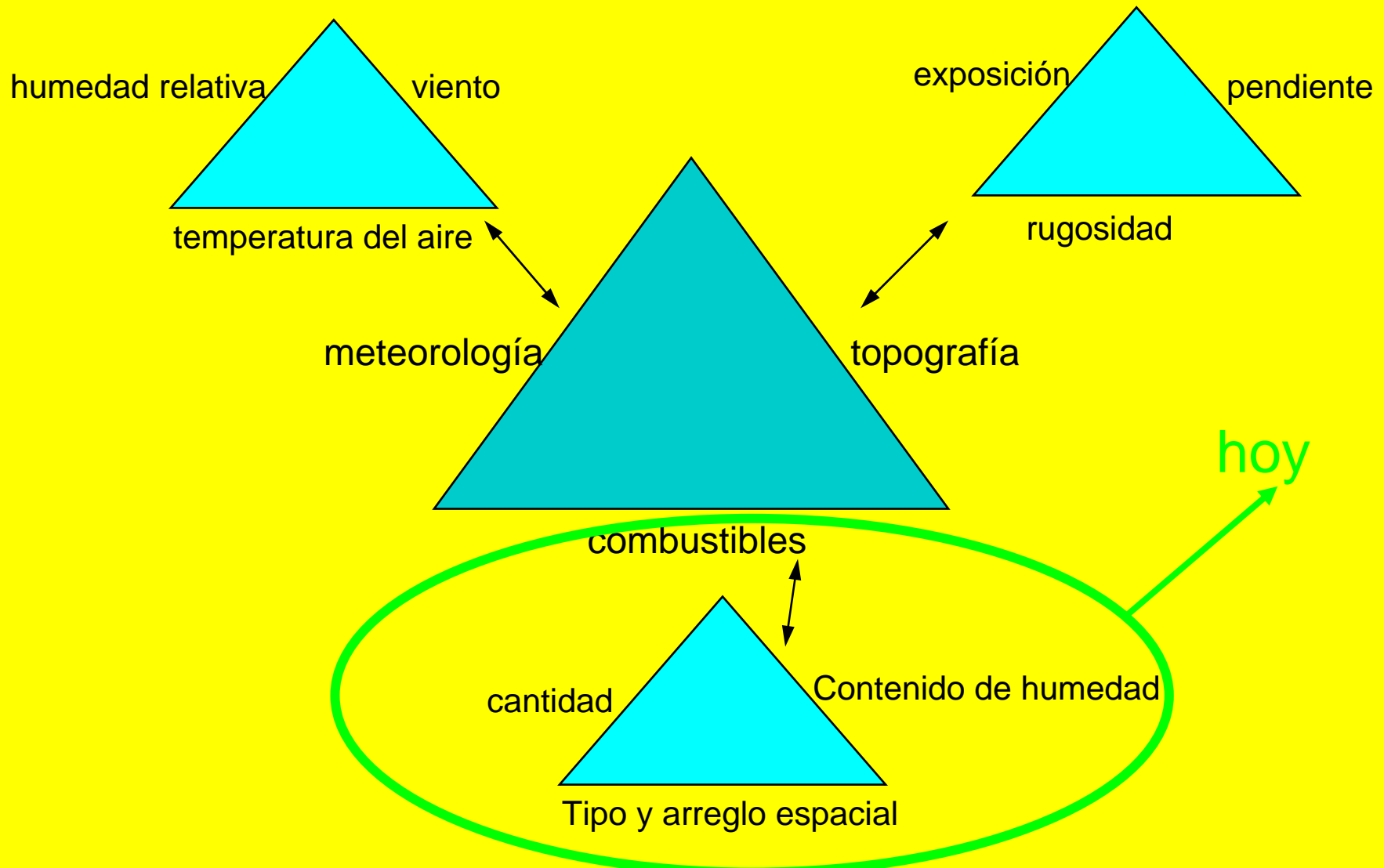
sin llama,  
brasas  
incandescente

# combustión

con llama

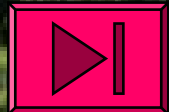


# Comportamiento del fuego



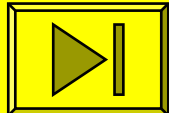
# Podemos actuar sobre el combustible

- Único lado del triángulo sobre el que podemos actuar



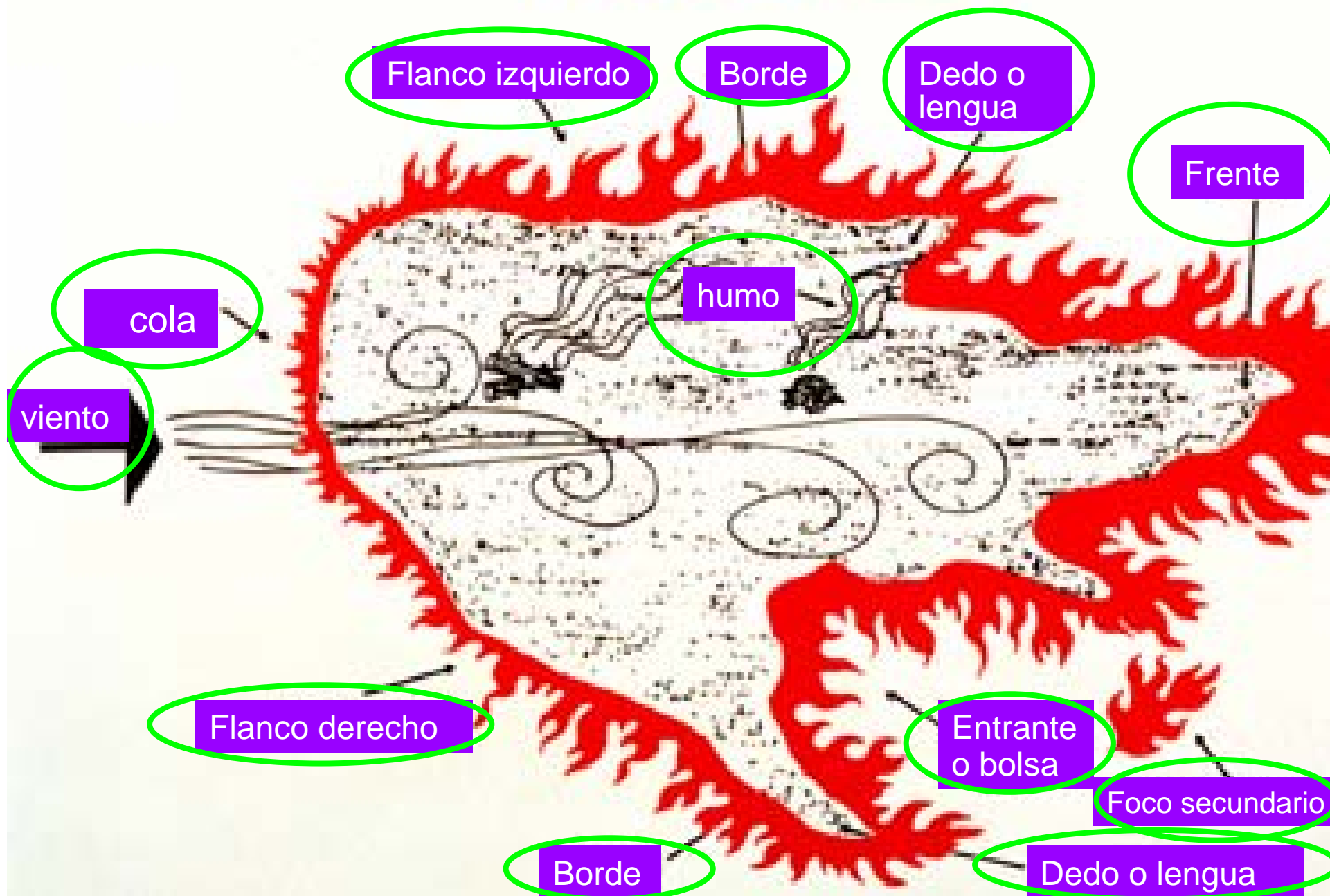
# NUEVO triángulo del Comportamiento del fuego

**Resto de los factores:  
combustibilidad de la vegetación**





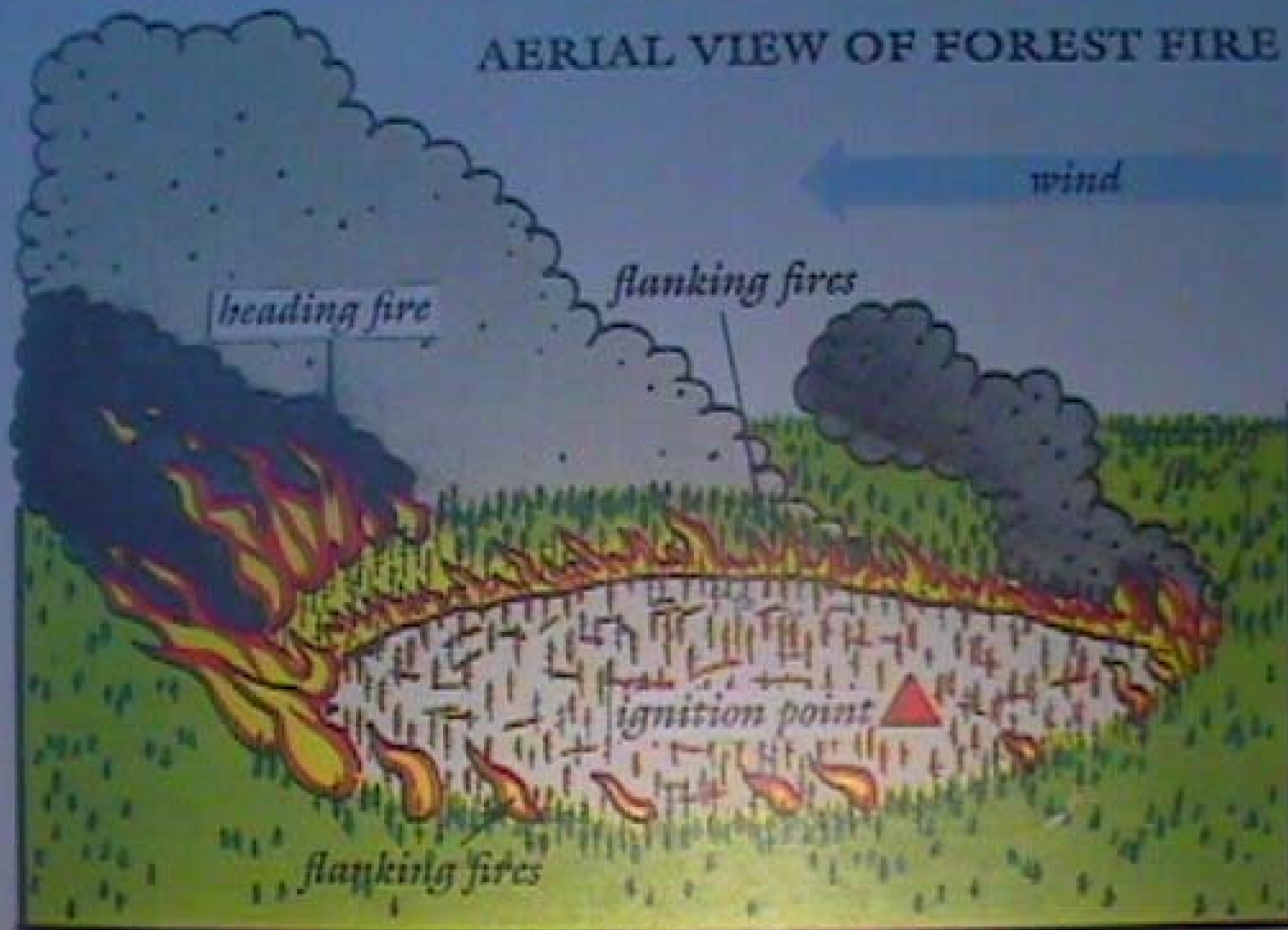
## PARTES DE UN INCENDIO



# Vista aérea

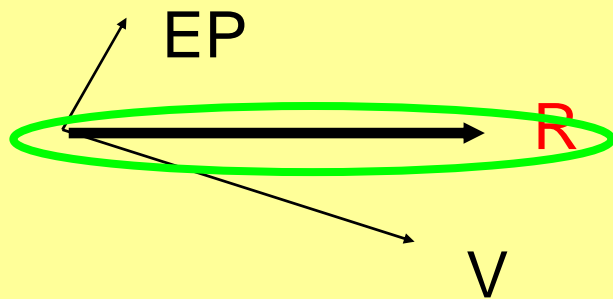
③ glowing combustion

## AERIAL VIEW OF FOREST FIRE



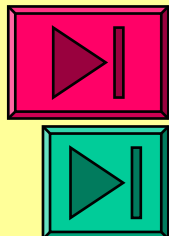


# Vector propagación del fuego



- **R**- vector propagación (resultante) – combinación vectorial de **EP** – vector efecto pendiente, y **V**- vector viento

- Partes de un fuego  
flanco frío / W (oeste) / izquierdo  
azimut / dirección y sentido de avance
- Fuego a favor / máx propagación / en cabeza  
en contra / mín propagación / de cola  
de flanco



# Pavesas – firebrands, embers



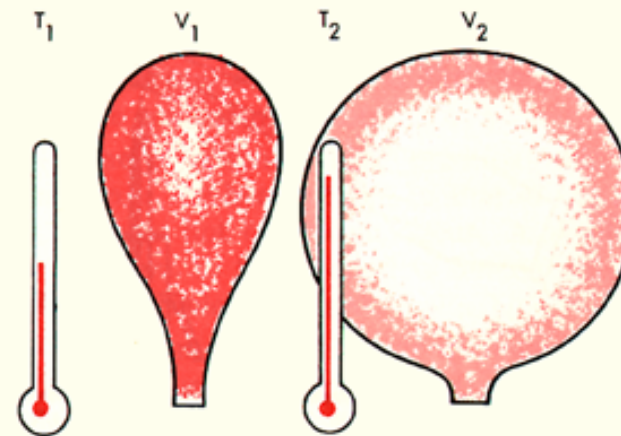
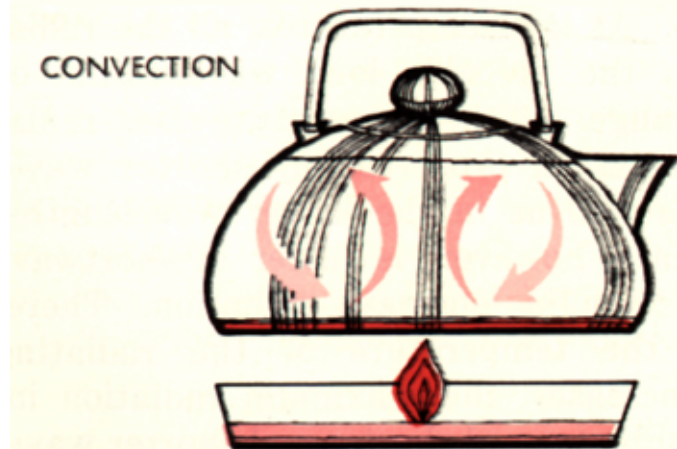
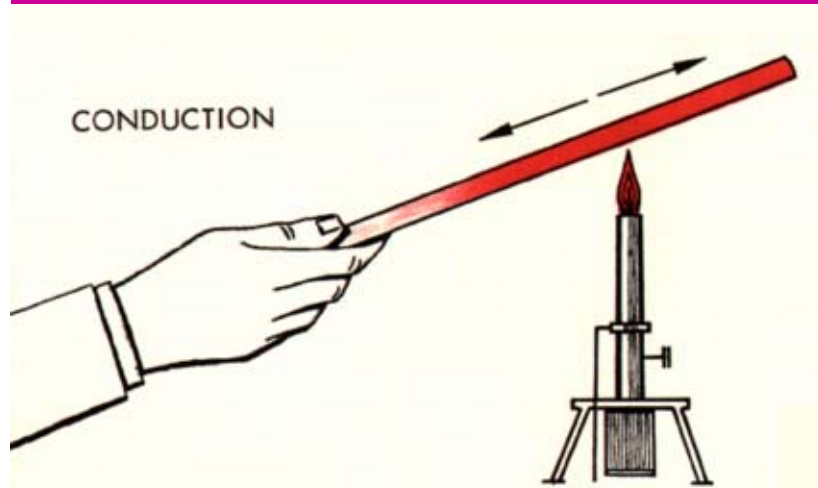
# Combustión y transmisión del calor

- Combustion & heat transfer - a physico-chemico perspective
  - radiation
  - convection
  - conduction
  - the special case of the spotting process



# Transmisión del calor

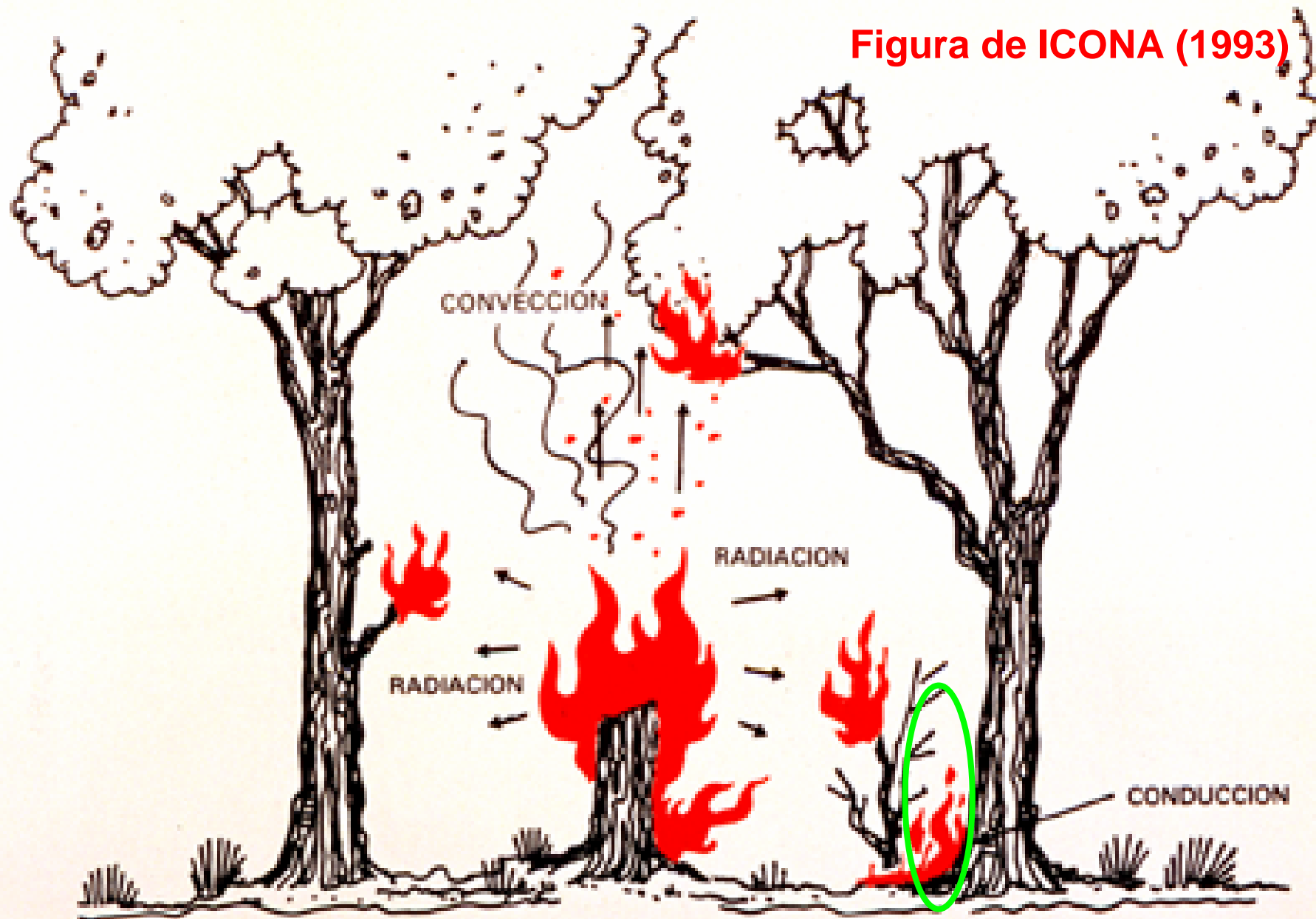
- Figuras del libro:  
Cottrell, W.H.1989. The book of fire. Mountain Press Publishing Company



EQUAL PRESSURES

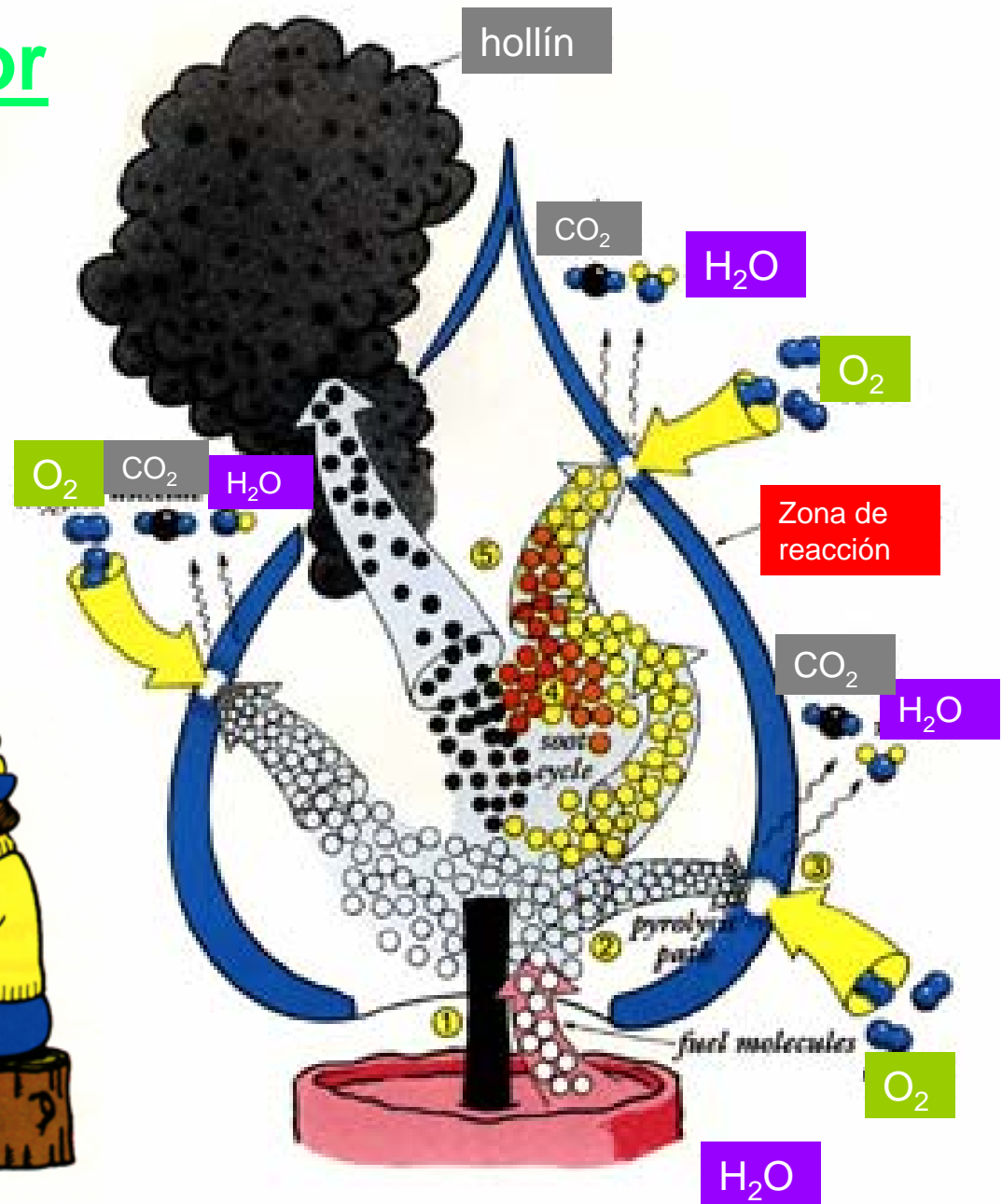
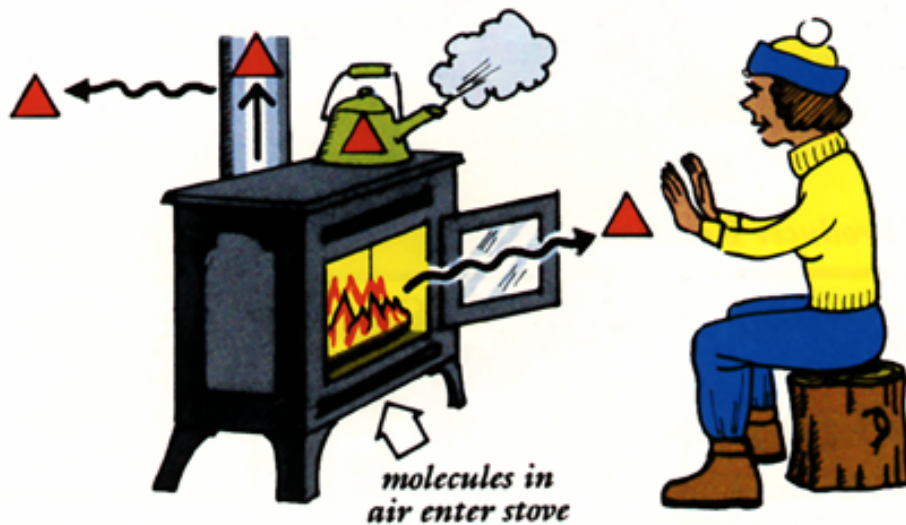
# PROPAGACIÓN ESPACIAL / transferencia de calor

Figura de ICONA (1993)



# Transmisión del calor

- Figuras del libro:  
Cottrell, W.H.1989.  
The book of fire.  
Mountain Press Pub. Co.

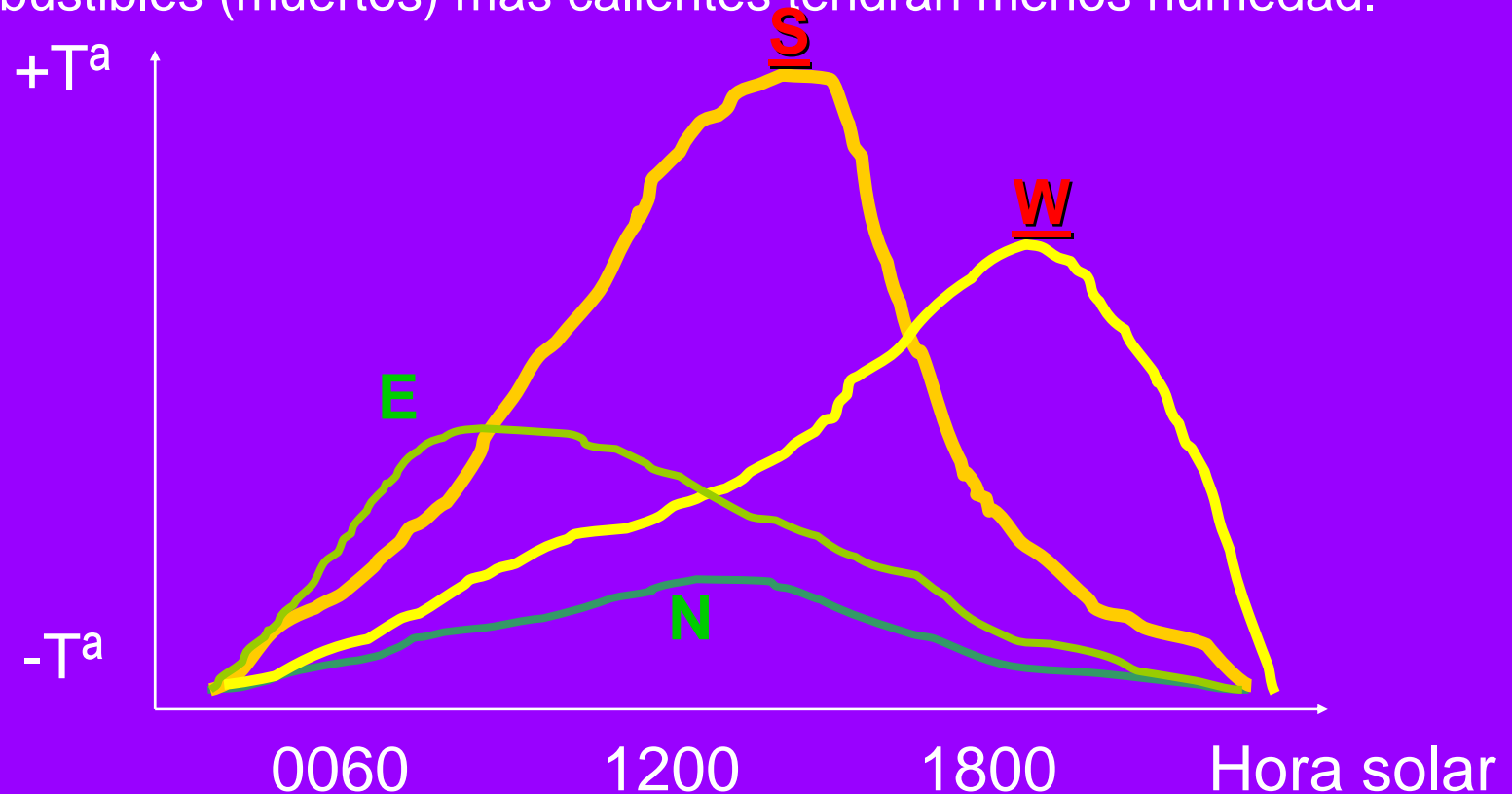




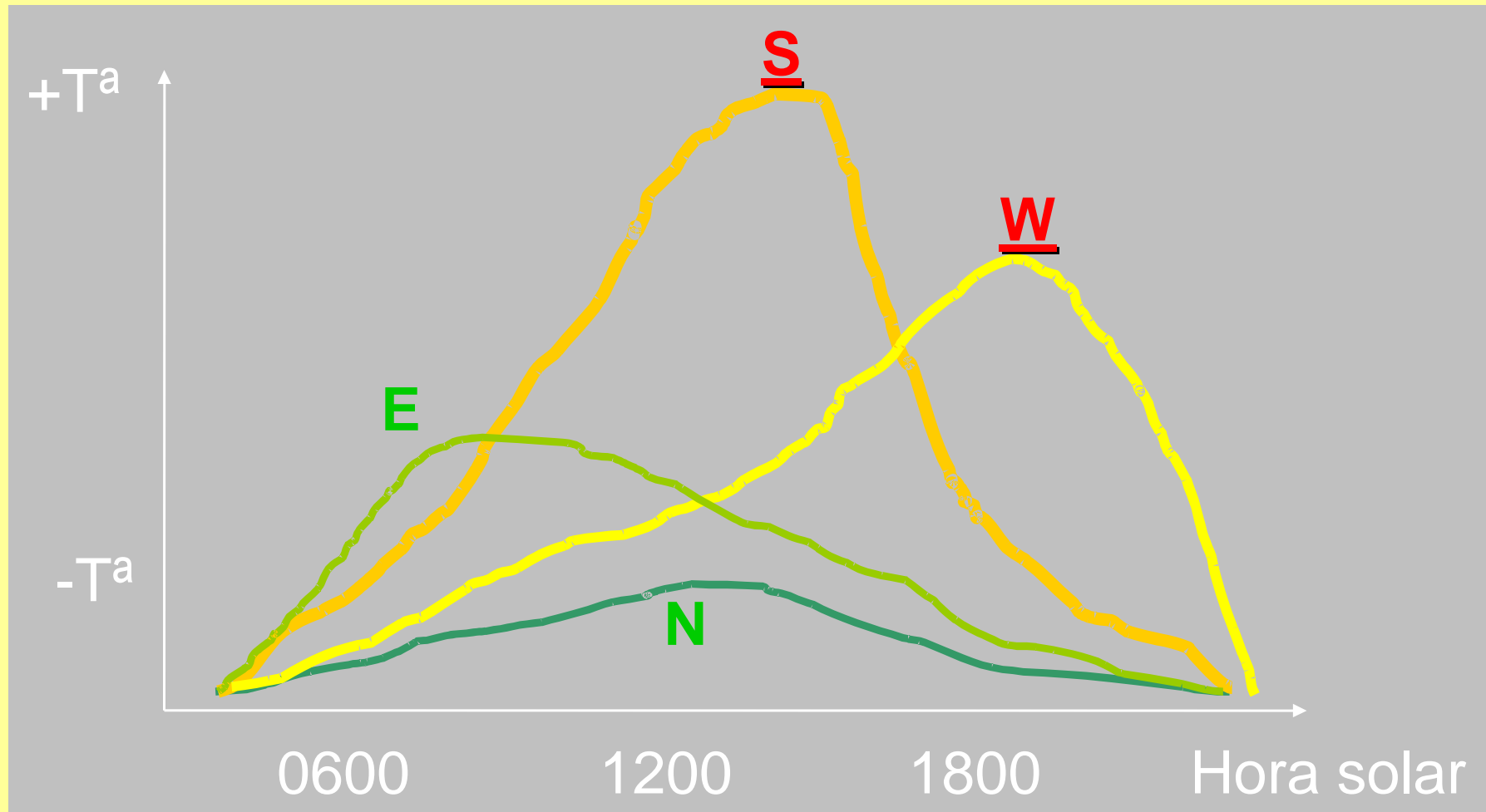
# Calor en las distintas exposiciones

## Curvas de combustibilidad

- distintas exposiciones y calentamiento a lo largo del día
- Los combustibles expuestos tienen  $T^a$  mayor que aquellos que están a la sombra (por ej.  $25^{\circ}\text{C}$  más).
- Los combustibles calientes necesitan de un precalentamiento menor para poder inflamarse.
- Los combustibles (muertos) más calientes tendrán menos humedad.



## Curvas horarias de la $T^a$ del combustible



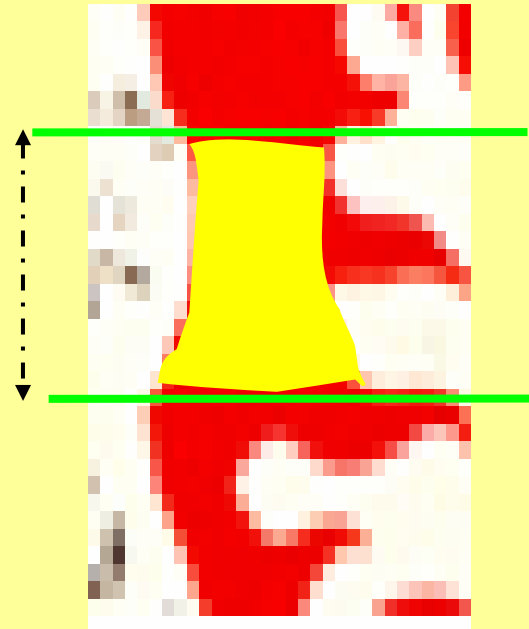
Gráfica 3.1: Curvas horarias de la temperatura del combustible. En abscisas, la hora solar (no es la misma que la del reloj) y, en ordenadas, la temperatura del aire cercano al combustible. Cada curva corresponde con el calentamiento de cada orientación. Dibujo de Domingo Molina

# Intensidad lineal de llama - gráficamente

- Un epi-radiómetro nos mide la intensidad de radiación de un foco caliente
- Sección que radia calor (anchura del frente de llamas, por un metro de frente) – en amarillo en el dibujo
- Lo que radia esa sección elemental en la unidad de tiempo es la Intensidad lineal de frente
- $I_f = \text{intensidad lineal de llama (kW/m)}$   
 $I_f$  - Intensidad lineal del frente de llamas - energía liberada por unidad de tiempo y por unidad lineal de frente (durante la combustión con llama)



1 m





# Términos básicos para describir el comportamiento del fuego -2

- **Otros**
- $I_r$  - Intensidad de reacción - energía liberada por unidad de tiempo y por unidad de área (durante la combustión con llama)
- $Q_r$  - Calor de reacción - energía liberada por unidad de área (durante la combustión con llama)
- $I_f$  - Intensidad lineal del frente de llamas - energía liberada por unidad de tiempo y por unidad lineal de frente (durante la combustión con llama) - **ya visto**

# Intensidad lineal de llama

- La velocidad con la que los incendios liberan energía es un factor importante en la dificultad de controlarlos y en los efectos que producirán. La definición más usada de intensidad de llama es la *velocidad de liberación de energía* (esto es, *potencia*) por unidad de frente (unidades de longitud).

- $I_f = H W R$

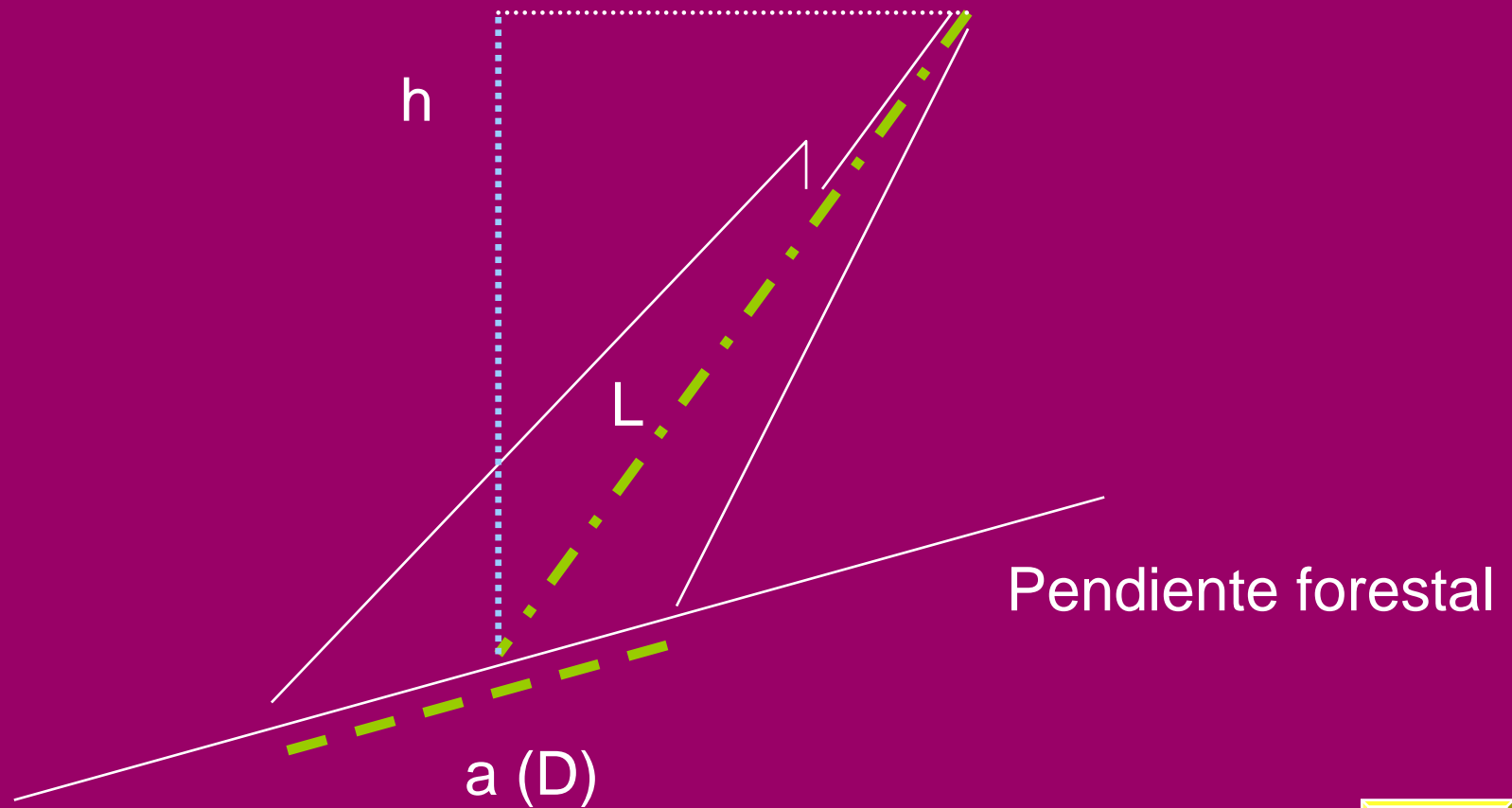
- $I_f$  = intensidad de llama (W/m)
- $H$  = calor de combustión o poder calorífico (kJ/kg)
- $W$  = (carga de) combustible consumido en la unidad de área (kg/m<sup>2</sup>)
- $R$  = velocidad de propagación (m/s)
- La intensidad de llama no puede ser calculada a partir del conocimiento de  $W$  y  $R$  a no ser que todo el combustible sea consumido **durante** la **combustión con llama** (esto es, en el frente del incendio). Difícilmente se da el caso en combustibles leñosos, pero puede serlo en combustibles herbáceos. Es por esto que, la intensidad de llama se estima a partir de la *longitud de la llama* ( $L$ ).

## L, y no h, estimador insesgado de $I_f$

- $I_f = a L^b$ , donde a y b son parámetros determinados empíricamente.
- $I_f = 259 L^{2.17}$ , donde  $I_f$  se da en kW/m y L en m.
- Esta fórmula sobreestima los valores de  $I_f$  cuando  $L < 0.5$  m

# combustión con llama

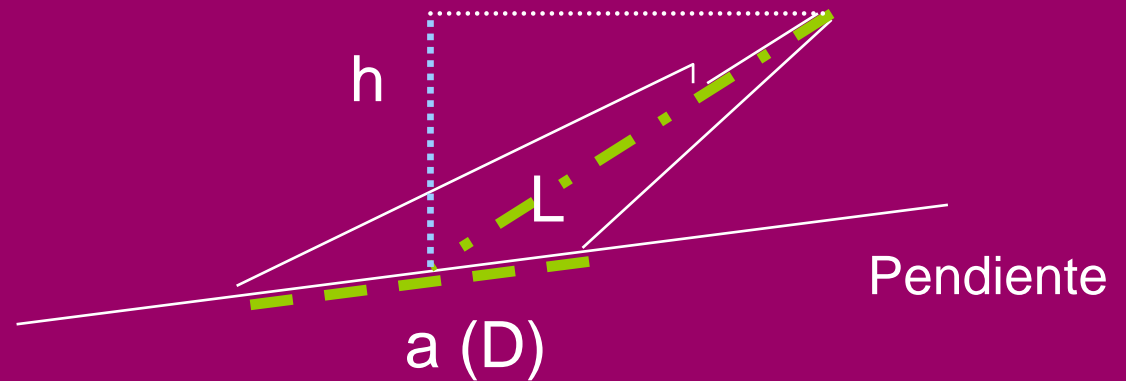
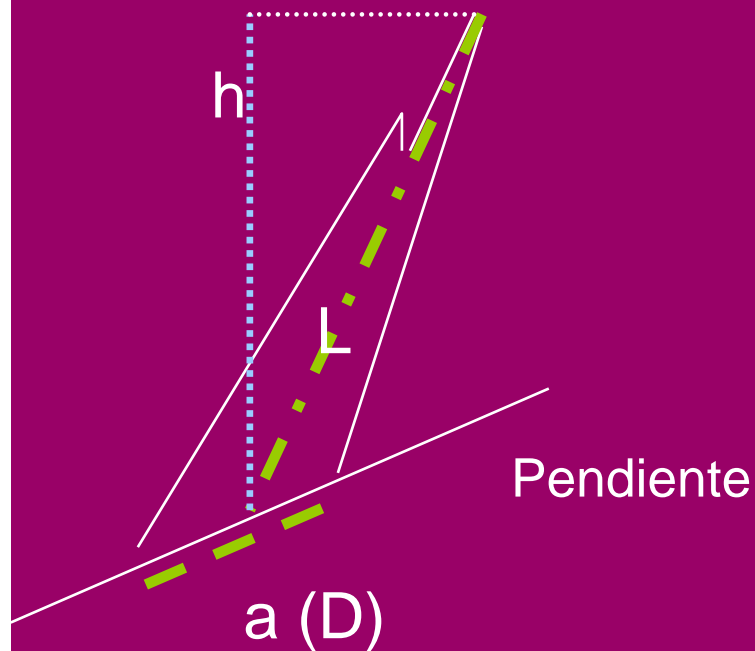
- Esquema transversal de una llama
- La gran importancia que tiene estimar adecuadamente  $L$
- Estimación ocular entrenada (buen estimador de  $L$ )





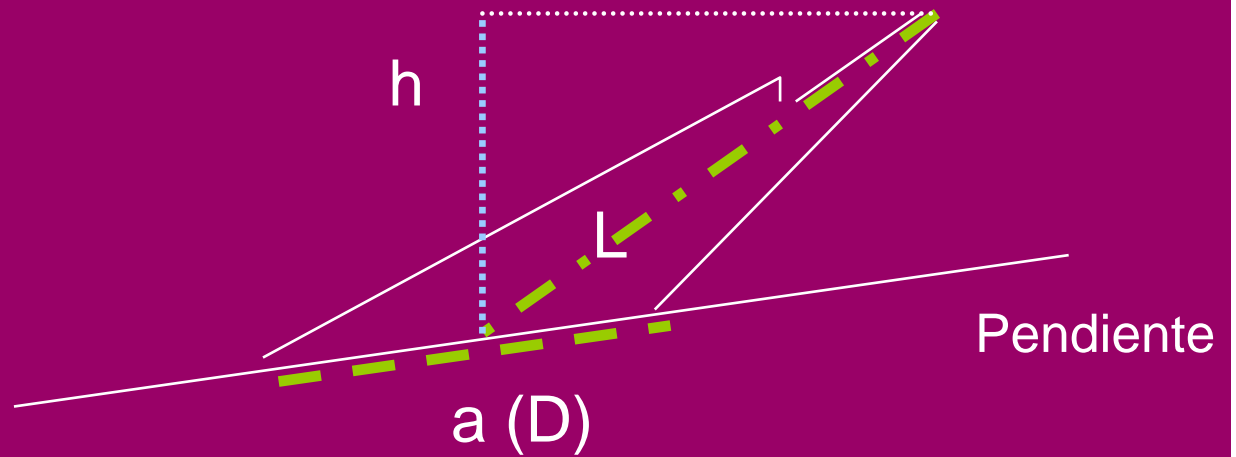
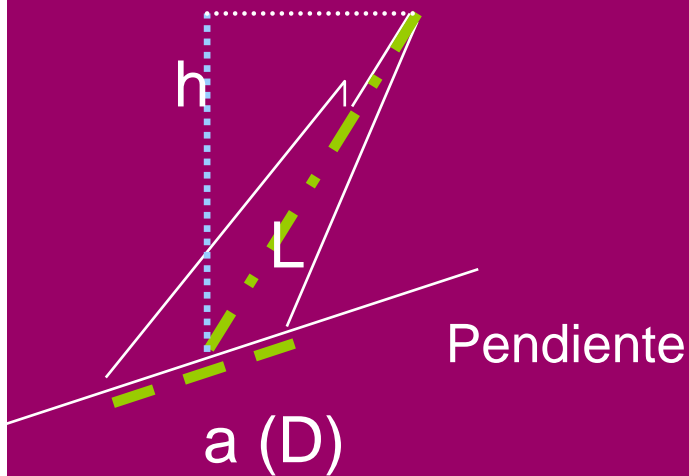
# combustión con llama

- Misma  $L$ , distinta  $h$
- **misma** liberación de calor por unidad de frente ( $\equiv L$ )
- es un error pensar que se libera más calor en la figura representada en la izquierda



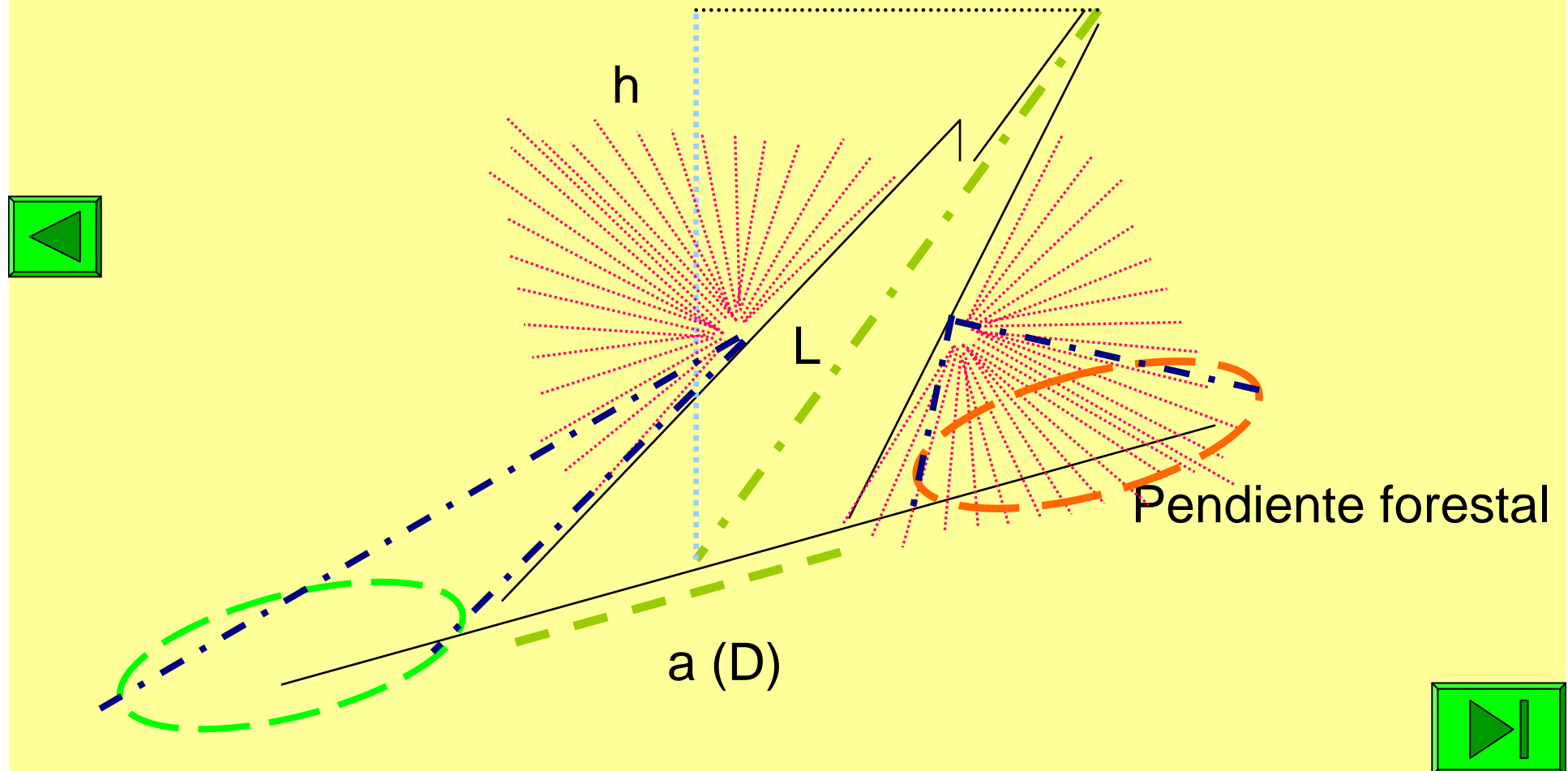
# combustión con llama

- Misma  $h$ , distinta  $L$
- **distinta** liberación de calor por unidad de frente ( $\neq L$ )
- es un error pensar que se libera igual en ambas figuras (al ser  $h$  igual en ambos casos)
- es importante educar (entrenar) **anotar con precisión  $L$**



# Efecto pendiente

- Pendiente arriba (en ausencia de viento) L y R son mayores



# Combustión incandescente

- Combustión sin llama tras paso del frente





## Consumo de combustible

- no existe unidades de tiempo en el consumo de combustible.
- La cantidad de combustible consumido en el frente de llama ( $C_f$ ) se calcula dividiendo  $I_f$  (estimado a partir de la longitud de la llama) por el producto de  $R$  y  $H$ .
  - $C_f = I_f / H R$
- Este cálculo, aún no siendo exacto, nos permite obtener una idea de la importancia de la combustión incandescente que continúa un buen rato después de que el frente de llamas ha pasado.

# Velocidad de propagación del frente

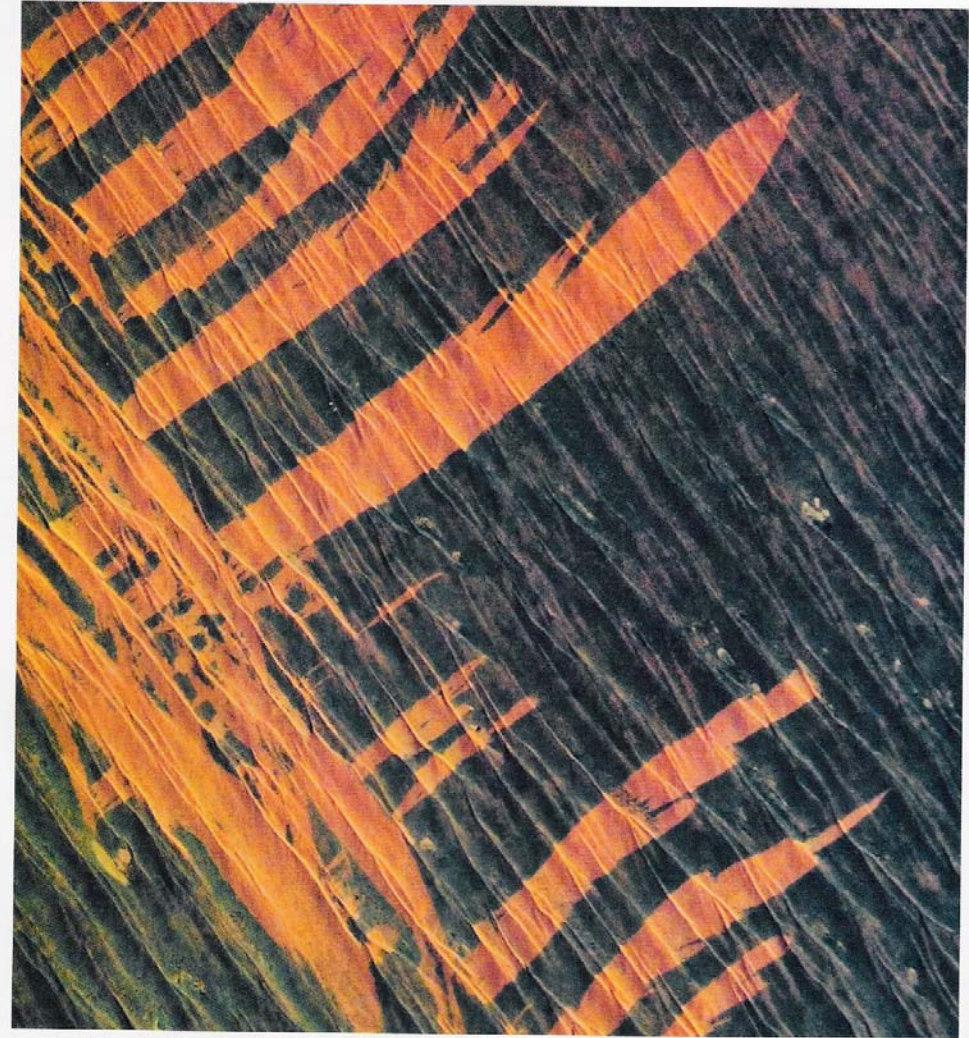
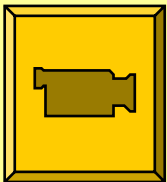
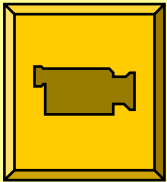
- Es la relativa actividad de un fuego al extenderse sobre la superficie del terreno
- La velocidad de propagación (en sentido estricto) describe la velocidad de avance del frente (km/h) hacia delante, hacia atrás o en los flancos. Esto nos indicará cuánto tardará el frente de llamas en atravesar una distancia dada. Así sabremos donde colocar las líneas de control para hacerlas antes de que lleguen las llamas. La velocidad de propagación para unas condiciones dadas de combustibles y tiempo atmosférico es proporcional a la intensidad lineal de llama
- La segunda velocidad de propagación es la *velocidad de propagación del perímetro*. Esto nos dice cuánta línea de control más tenemos que construir. Es muy importante para determinar los recursos humanos y mecánicos requeridos.
- La tercera velocidad de propagación es la *velocidad de propagación del área*. Es importante para determinar el área afectada directamente por el fuego y el virtual daño o beneficio a los recursos naturales.

# Tiempo de residencia

- Es el tiempo que el fuego resida en un punto dado. Nos referiremos a las llamas que contribuyan al frente; esto es, no consideraremos llamas en troncos que duren largo tiempo pero que no contribuya más al frente.
- $T_f = D / R$
- $T_f$  = tiempo de residencia del frente de fuego
- $D$  = anchura de las llamas en su base (sobre el suelo forestal)
- $R$  = velocidad de propagación

# Cambio de viento y barrancos

- Link



Un incendio en el *outbak* de Australia dejó un rastro abrasado, y un testimonio de los cambios de dirección del viento del desierto.

**Cicatrices de incendios** En el desierto de Simpson, Australia, las señales naranja marcan la trayectoria de un incendio provocado por un rayo. Al principio, los vientos del noroeste impulsaron las llamas paralelamente a los surcos de osagra. Cuando sopló el viento del sudoeste, el incendio giró 90 grados, y siguió avanzando hasta que se extinguió al cesar el viento. Tras desaparecer la maleza carbonizada, emergió la arena subyacente, anaranjada y rica en hierro. «Antes estas marcas solían cartografiarse desde el suelo o desde un avión –dice Nigel Tapper, de la Universidad de Monash–. Las imágenes de satélite han cambiado la forma de trabajar de los científicos.» —Alan Mairson





# Conclusiones

- combustión
  - ■ combustibles: un lado del triángulo del comportamiento del fuego – podemos actuar
  - longitud de llama,  $R$ ,  $I$ ,  $Q_r$ , - variables del comportamiento del fuego
  - parámetros de los combustibles forestales: tamaño, arreglo espacial, contenido de humedad, ...
  - Vector propagación del fuego
  - combustible disponible
  - pavesas, antorcheo, estabilidad atmosférica
  - BEHAVE
  - FARSITE

