CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

2.1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES

De acuerdo con la ISO (International Standards Organization, 1987; Cox, 1995) un incendio se define como:

a). Un proceso de combustión, caracterizado por la emisión de calor acompañada de humo, llamas o ambos.

b). Combustión que se propaga de manera incontrolada en el tiempo y el espacio.

En los textos se encuentra comúnmente definido como una reacción química fuera de control que se caracteriza por la generación de energía. Cuando dicha reacción afecta a la superficie vegetal en un espacio abierto se la denomina incendio forestal. Existen varias clasificaciones de este tipo de incendios, de acuerdo con la morfología, el grado de intensidad o el patrón de comportamiento. La clasificación genérica en el mundo forestal en función de los estratos de combustible alcanzados y la forma del avance es la siguiente: incendios de subsuelo (*ground fire*, en la literatura anglosajona), incendios de superficie (*surface fire*) e incendios de copas (*crown fire*).

2.1.1. Incendios de subsuelo

Este tipo de incendio se produce cuando quema la materia orgánica que se encuentra entre la superficie y la capa mineral del suelo; dicha materia orgánica está compuesta por virutas, hojas muertas, raíces, residuos vegetales en descomposición, humus, etc. Este tipo de incendios puede ser que sean detectados sólo por la emisión de humo, ya que normalmente queman sin llama. Avanzan lentamente debido a la insuficiencia de oxígeno y pueden mantenerse incluso con contenidos elevados de humedad durante días o semanas (Frandsen, 1987), ocasionando daños considerables en el ciclo ecológico. Estos incendios son poco frecuentes.

2.1.2. Incendios de superficie

Se consideran dentro de este tipo de incendios aquellos en los cuales se quema el material combustible situado inmediatamente sobre la superficie del suelo, sin alcanzar las copas de los árboles. Esta capa comprende hojas, ramas muertas, troncos caídos, restos de talas, vegetación herbácea viva y matorrales. Este tipo de incendios son los más comunes y, en consecuencia, los más estudiados (Trabaud, 1992).

2.1.3. Incendios de copas

Se caracterizan por incorporar en mayor o menor grado la combustión de las copas de los árboles. Son los que presentan mayor dificultad para la extinción y peores efectos sobre la masa forestal, y se subdividen en tres categorías: incendios de copas pasivos, incendios de copas activos e incendios de copas independientes.

Incendios de copas pasivos

Las copas de los árboles (hojas, ramas y troncos) se encienden de manera intermitente debido al calor procedente del frente de un incendio que se desarrolla en el sotobosque. Este fenómeno también se denomina incendio de copas discontinuo o incendio de antorcha. Es frecuente en zonas de pinos y matorrales densos.

Incendios de copas activos

Se denomina también incendio de copas continuo o dependiente (*running crown fire* o *continuous crown fire* en la terminología anglosajona). La combustión tiene lugar al mismo tiempo en el material combustible superficial que en las copas de los árboles. El calor de las llamas proviene de incendios de superficie que proporcionan energía suficiente para sostener y propagar el incendio por las copas.

Incendios de copas independientes

En este caso, el frente del incendio avanza rápidamente por las copas, con independencia de la posible presencia de un incendio de superficie. Son muy peligrosos aunque poco frecuentes.

Los incendios de copas pueden favorecer la generación de incendios secundarios más allá del frente del incendio (*spotting*). Estos incendios secundarios se inician por el efecto de partículas sólidas vegetales en combustión, que viajan en la columna de convección o transportadas por el viento a una cierta distancia del incendio (pudiendo llegar a ser del orden, en algunos casos, de decenas de kilómetros). Son situaciones imprevisibles, de gran peligro y que dificultan enormemente los trabajos de prevención y extinción.

Los incendios de subsuelo, de superficie y de copas pueden suceder de manera conjunta o en una combinación entre ellos, variando frecuentemente el régimen del incendio de acuerdo con los múltiples factores que afectan al fenómeno.

2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

El conocimiento de las diferentes características físicas de los incendios forestales es imprescindible para describir y entender su comportamiento. Además, los parámetros físicos más relevantes proporcionan información que de forma directa puede emplearse para decidir sobre los medios de extinción necesarios.

La predicción de las características físicas permite la evaluación de consecuencias y efectos de los incendios, y constituyen una ayuda en el diseño de estrategias de lucha adecuadas y en la planificación de tareas de prevención.

2.2.1. Morfología y partes de un incendio

Los incendios forestales pueden desarrollar diversas formas geométricas. Su morfología se puede percibir de forma visual, encontrándose descrita en un cierto número de publicaciones

(Arnaldos et al., 2001; Trabaud, 1992; Dupuy, 1997; Rodríguez, 1996). En general, los incendios forestales pueden adquirir formas circulares, elípticas o, lo que es más común, irregulares. Tales formas están determinadas principalmente por las condiciones meteorológicas (dirección y velocidad del viento), topográficas (pendiente, tipo de suelo) y ecológicas (variación en el tipo de combustible). La Figura 2.2.1 muestra de forma orientativa las diversas formas en las que puede propagarse el frente de un incendio forestal.

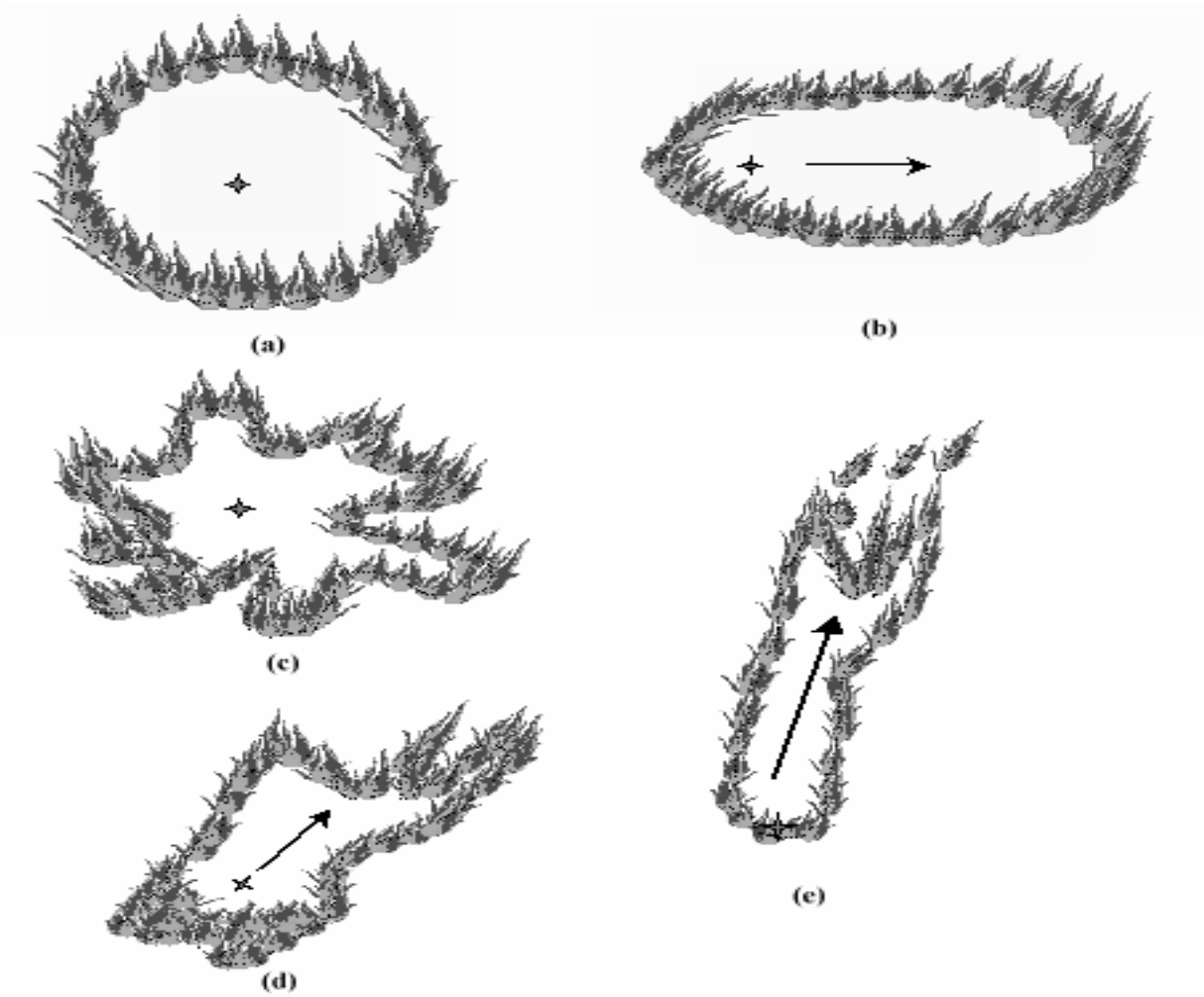

Figura 2.2.1.Esquema de las formas típicas de un incendio. a) Incendios de progresión circular. b) Incendios de progresión elíptica. Incendios de forma irregular: c) Viento variable y/o topografía irregular con distribución heterogénea del combustible. d) Incendio que, impulsado por el viento, sube por una ladera, mientras restos encendidos en movimiento y en dirección opuesta al frente mantienen el fuego en la base de la pendiente. e) Un fuerte viento transporta por delante del frente material combustible incandescente (focos secundarios).

Incendio de forma circular

Se produce en terreno plano, con combustible homogéneo y sin viento (Figura 2.2.1. a). El frente del incendio avanza en todas direcciones desde la zona central hacia el exterior.

Incendio de forma elíptica

Se caracteriza por la presencia de viento con una dirección predominante, se quema combustible homogéneo y se propaga sobre terreno plano o pendiente regular (Figura 2.2.1. b).

Incendio de forma irregular

Se desarrolla bajo la influencia de viento (con variaciones en su intensidad y dirección), se quema combustible heterogéneo y/o se propaga en pendientes irregulares (Figura 2.2.1. c, 2.2.1.d, 2.2.1.e).

En la Figura 2.2.2 se representan las diferentes partes que conforman un incendio, descritas a continuación.

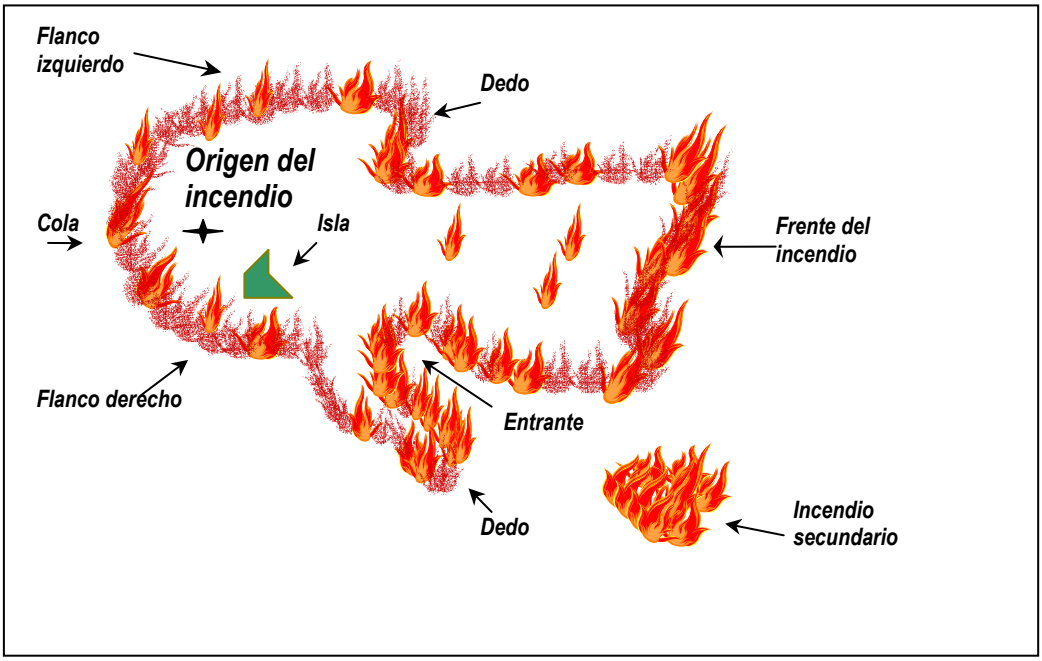

Figura 2.2.2. Partes de un incendio

<u>*Línea del incendio*</u>: es el perímetro del incendio en un momento determinado.

<u>*Frente*</u>: es la parte perimetral del incendio directamente influida por la velocidad del viento y la topografía del terreno, y es donde se produce la mayor velocidad de propagación y generación de calor. En consecuencia, es la parte que ocasiona los mayores daños y su dominio constituye la clave para el control del incendio; a su vez, su extinción es la más difícil.

<u>*Cola*</u>: es la parte opuesta al frente y por lo general la más próxima al origen del incendio, así como a la procedencia del viento. Generalmente, es la parte que quema más lentamente y con poca intensidad; consecuentemente es la parte más fácil de combatir y dominar.

<u>*Flancos*</u>: son las partes situadas entre el frente y la cola del incendio. Se esparcen en una dirección perpendicular a la línea principal de propagación del incendio. Se

distingue en general un flanco derecho y otro izquierdo. No queman de forma tan intensa como el frente aunque son más activos que la cola.

Dedos: son fuegos que progresan detrás del frente, pudiendo dividirse en varias partes largas y estrechas, con una intensidad y tamaño propios según las condiciones locales. Cada dedo puede desarrollar un nuevo frente de incendio.

Islas: son áreas localizadas en el interior del perímetro del incendio, con presencia de restos de combustible sin quemar.

Entrantes: son partes del perímetro de un incendio que se desarrollan más lentamente a causa de la presencia de obstáculos o situaciones desfavorables.

Focos secundarios: son incendios que se producen fuera del perímetro del incendio a causa de la emisión de partículas combustibles incandescentes.

2.2.2. Características físicas del frente de un incendio

Las características físicas del frente de un incendio proporcionan información muy valiosa para predecir el comportamiento del mismo. De la exactitud de su descripción o predicción, dependerán en gran medida los resultados obtenidos con los diversos modelos aplicados.

Velocidad de propagación

Es la distancia recorrida por el incendio por unidad de tiempo. Puede aplicarse a cualquier segmento del perímetro de un incendio (frente, cola o flancos). La velocidad de propagación depende directamente de la velocidad del viento, de la pendiente del terreno, del tipo de combustible y de sus condiciones. Por tanto, tiene un comportamiento variable. A pesar de lo anterior, para efectos prácticos suele considerarse con un valor medio para una extensión determinada.

Intensidad lineal

Es la cantidad de calor que se libera en el frente de un incendio por unidad de tiempo y de longitud; también puede definirse como la potencia calorífica total por metro de amplitud del frente. Byram (1959) desarrolló una expresión para cuantificar la intensidad lineal del frente de un incendio:

$$I_B = \Delta H_c m_c^{'} u_{incendio} \tag{2.1}$$

donde

ΔH_c	poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)
$m_c^{'}$	masa de combustible quemado por unidad de superficie (kg/m^2)
$u_{incendio}$	velocidad de avance lineal del frente del incendio (m/s).

Según Alexander (1982), frecuentemente se suele sobreestimar la intensidad lineal de un incendio, debido a que la masa de combustible considerada, m'_c, se calcula mediante la diferencia entre la masa existente antes y después del incendio, obteniéndose los datos de los respectivos inventarios de combustible. Por ello, Finney (1992) sugirió que en la ecuación (2.1) sólo se considerase aquella cantidad de masa que se consumiera durante el paso del frente de las llamas, excluyendo los residuos que se mantengan posteriormente en combustión (estos residuos poden continuar quemando durante horas o días).

Parte del interés de este parámetro es debido a que diferentes características geométricas de la llama se relacionan con este concepto. Asimismo, el trabajo de Rothermel (1983), el cual lo empleó directamente para sugerir propuestas de ataque del frente del incendio, puso de manifiesto el interés de la intensidad lineal de generación de calor.

Tiempo de residencia del frente de llama

Se define como el período de tiempo durante el cual se mantiene este frente en un punto en concreto (Merrill y Alexander, 1987). Por tanto, está relacionado con la profundidad de la llama y determina la velocidad local de propagación del frente. Es un parámetro difícil de medir, dado que el combustible que quema es continuo en el espacio lo que dificulta el cálculo del tiempo en que la llama se encuentra en un punto fijo.

Los métodos empleados para estimar el tiempo de residencia de la llama se basan en observaciones de incendios reales auxiliadas por fotografías y vídeos; o bien, se estima a partir de experimentaciones de incendios en laboratorio, en túneles de viento o pruebas de campo, midiendo este parámetro con la ayuda de termopares en la zona de propagación del incendio; éstos termopares proporcionan valores de temperatura en un punto fijo en función del tiempo. Es importante conocer el tipo de combustible existente en el lugar en que se estudia el tiempo de residencia, ya que éste es función de las características de homogeneidad del combustible. Si dicho combustible es homogéneo, el tiempo se denomina tiempo de residencia de la llama en las partículas del combustible *(t_R)*. Se considera que el combustible es uniforme y el tiempo que se necesita para quemar una partícula, en presencia de la llama, será el mismo tiempo durante el cual el frente del incendio esté en dicho punto (Anderson, 1969). Si el combustible es heterogéneo, se le denomina tiempo de residencia del frente de llama *(t_r)*; se trata de combustible no uniforme y este parámetro es un valor medio del tiempo que tardan en quemar todas las partículas que conforman el combustible en un punto determinado.

<u>*Tiempo de residencia de la llama en las partículas de combustible (t_R)*</u>: Los estudios realizados para medir el tiempo de residencia de la llama en las partículas suelen relacionarlo con las características físicas de los diferentes componentes vegetales, como el diámetro medio y la relación superficie/volumen, mediante expresiones empíricas.

Anderson (1969) proporcionó una expresión del tiempo de residencia para partículas individuales de combustible en función de su diámetro:

$$t_R = 189 D_c \tag{2.2}$$

donde

t_R tiempo de residencia de la llama en las partículas (s)
D_c diámetro de la partícula de combustible (cm).

Otra expresión para estimar este mismo parámetro en función de la relación superficie/ volumen de una partícula es (Andrews, 1986):

$$t_R = \frac{75558}{\sigma} \tag{2.3}$$

donde

t_R tiempo de residencia de la llama en las partículas (s)
σ relación superficie/volumen de la partícula de combustible (m^{-1}).

Es fácilmente observable que el tiempo de residencia de la llama se incrementa cuando la relación superficie/volumen de una partícula disminuye.

Tiempo de residencia del frente de llama (t_r): debido a las discrepancias existentes en lo referente a la definición (Fons, 1962; Cheney, 1990), las predicciones del tiempo de residencia del frente de llama no se han realizado en función de las características físicas del combustible (diámetro y relación superficie/volumen), sino en función del espesor de la llama (S_f) y de la velocidad de propagación del frente (u). La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$t_r = \frac{S_f}{u} \tag{2.4}$$

donde

t_r tiempo de residencia del frente de llama (s)
S_f espesor de la llama (m)
u velocidad de avance lineal del frente del incendio (m/s).

Esta ecuación ha sido validada con experimentaciones de campo (McArthur y Cheney, 1967; McArthur, 1968) y experimentaciones de laboratorio (Byram, 1966; Rothermel y Anderson, 1966).

Tiempo de extinción (t_b): es el tiempo necesario para consumir totalmente las partículas presentes en un lecho de combustible (Cheney, 1990). Este período de tiempo es el necesario para que una partícula de combustible se queme totalmente, siguiendo las diferentes formas de combustión (combustión con llama, sin llama e incandescente).

Consideraciones sobre el tiempo de residencia de la llama: existen confusiones, cuando no discrepancias, entre los diferentes investigadores que dan distintas definiciones del tiempo de residencia; no obstante, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tiempo de residencia es directamente proporcional al grado de compactación del lecho de combustible y, en el caso de combustibles vivos, también al grado de humedad (Burrows, 2001).

- El diámetro del combustible que favorece al máximo la propagación de un incendio forestal está alrededor de los 0,6 cm (McArthur, 1962; Cheney, 1990; Burrows, 2001).

- Cuanto más grande es la velocidad del viento, menor es el tiempo de residencia de la llama (McArthur y Cheney, 1967).

Temperatura

Se han realizado numerosos estudios referentes a la temperatura en los incendios forestales. Trabaud (1992) realizó una interesante revisión que resume el trabajo de varios autores. A pesar del interés por estudiar esta variable, se considera que es una de las más difíciles de medir en un gran incendio. La dificultad radica en que en un incendio forestal la temperatura fluctúa permanentemente en el tiempo y el espacio. Alexander (1982) observó que una vez medida la temperatura con respecto al tiempo, se presenta el problema de la interpretación y aplicación de tal información (dado que dicha variable no ha sido correlacionada de forma que se le pueda dar una aplicación práctica, como en el caso de la intensidad lineal). Dicho de otra forma, a pesar de que la temperatura es una de las características más fáciles de determinar en un incendio, su valor por sí solo no lo caracteriza y su aportación más valiosa se obtiene cuando se relaciona con los mecanismos de transferencia de calor (ver sección 2.2.4 y Capítulo 4).

La temperatura es función del tipo de combustible, de su tamaño, de su distribución espacial, de su contenido hídrico y de la velocidad del viento. Dependiendo de la zona del incendio que se observe se registraran valores distintos (Figura 2.2.3.). Así, se puede distinguir:

Temperatura del suelo: Esta temperatura depende de la composición del lecho orgánico y de la composición mineral del suelo. De forma general, el aumento de temperatura de esta zona es mínimo, debido a la rapidez con que ocurre el fenómeno y a la mala conductividad térmica del suelo; en la bibliografía se encuentran valores para la superficie del suelo entre 250 ºC y 300 ºC. Estos valores disminuyen rápidamente en función de la profundidad. Trabaud (1992) determinó que a 5 centímetros de profundidad las temperaturas medias eran de 50 ºC y a partir de 10 centímetros de profundidad no detecto ningún aumento de temperatura. Desde un punto de vista del proceso de propagación del incendio y de la lucha contra incendios, la temperatura en el interior del suelo es de poco interés.

Temperatura de la zona de combustible: Es la temperatura que se observa en el lecho de combustible, por delante de las llamas en el sentido de la progresión del incendio. Básicamente es una zona precalentada por la radiación. Trabud (1992) determinó como temperaturas máximas en esta zona valores comprendidos entre 1040 ºC y 1370 ºC. Y para el caso de matorral (en un caso puntual) registró 500 ºC.

Temperatura de la zona de llamas: Los valores de esta zona del incendio se caracterizan por sus rápidas y grandes fluctuaciones, debidas a la turbulencia del

fenómeno. Trabaud (1992) estimó que las temperaturas en esta zona oscilaban entre 1200 ºC y 1600 ºC, mientras que Pyne (1996) determinó que los valores más frecuentes para esta zona en un incendio real se encuentran en el intervalo de 700 ºC a 980 ºC (aunque en condiciones ideales de laboratorio pueden alcanzar valores comprendidos entre 1900 ºC y 2200 ºC).

Temperatura de la columna de convección: Por encima de la zona de combustión las temperaturas varían ampliamente decreciendo de forma muy rápida en función de la altura. Aunque también influyen otros factores como la intensidad del frente de llama, la altura de la vegetación, las condiciones ambientales y posibles turbulencias. Como ejemplo de estas variaciones, Trabaud (1992) determinó, para un incendio de chaparral de 1,5 m de altura, valores de temperatura para esta zona de 280 ºC a 3 metros de altura y de 100 ºC a 6 metros de altura, mientras que a nivel de la vegetación (1,5 m) la temperatura era de 1000 ºC.

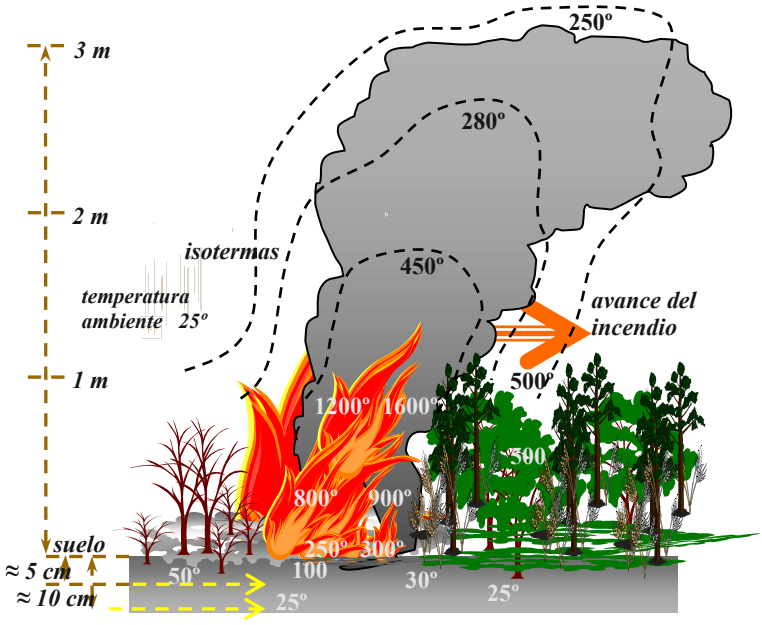

Figura 2.2.3. Distribución de temperaturas en el frente de un incendio de matorral (Trabaud, 1992).

2.2.3. Características geométricas de la llama en el frente del incendio

La geometría del frente se caracteriza por la altura, la longitud, el ángulo de inclinación y la profundidad o la anchura de su llama (Figura 2.2.4). Las definiciones de estas magnitudes no son las mismas de un autor a otro y a veces son ambiguas, lo cual dificulta su medición.

Altura de la llama (H)

Se define como la media de la dimensión vertical máxima de las llamas del frente de un incendio, medida desde la superficie hasta la punta de dichas llamas. Diferentes investigadores (McArthur, 1966; Nelson, 1980; Nelson y Adkins, 1986) han propuesto correlaciones que estiman la altura de la llama, teniendo resultados aceptables para muchos casos (Burrows et al., 1988), aunque estos resultados están limitados en el caso de incendios de copas.

Longitud de la llama (L_f)

Se define como la distancia entre la punta de la llama y el punto a la mitad de su espesor. También existen correlaciones para su cálculo, tales como las propuestas por Byram (1959) y la de Nelson y Adkins (1986).

Espesor o profundidad de la llama (S_f)

Es la zona donde se produce la combustión con llama de forma continua. Suele considerarse como la distancia entre la parte delantera y la parte trasera de la llama, midiéndose paralelamente al suelo. Existen varias correlaciones empíricas para su cálculo (Leicester, 1985; Nelson y Adkins, 1988; Simard, 1989).

Ángulo de la llama (ψ)

Se define como el ángulo formado entre la llama del frente del incendio y la superficie del terreno, pudiéndose medir entre la altura y la longitud de la llama. Para este parámetro también se han propuesto varias correlaciones experimentales (Rothermel, 1972; Nelson y Adkins, 1986; Albini, 1981).

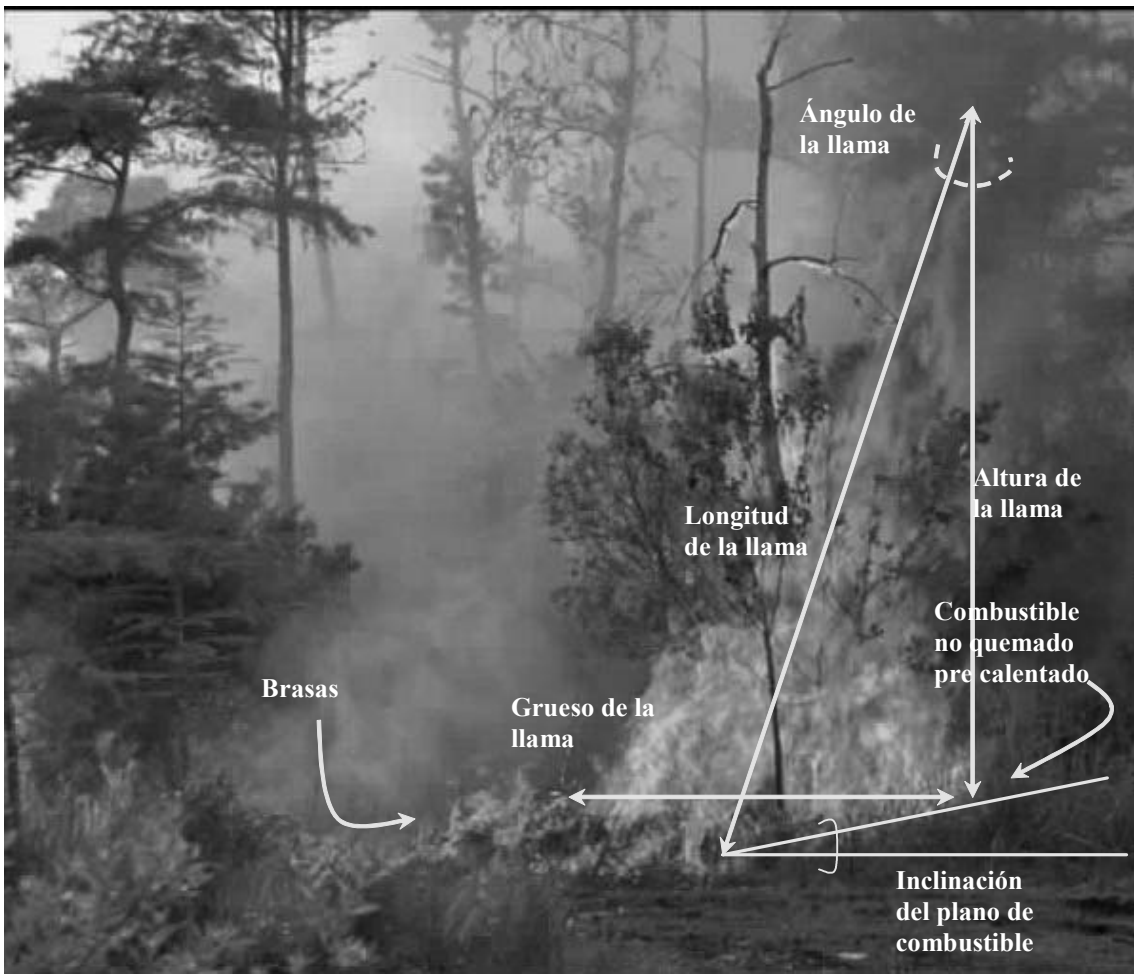

Figura 2.2.4. Características geométricas de la llama.

Las características geométricas de la llama en un incendio forestal son indicadores muy valiosos a la hora de estudiar el comportamiento de un incendio (ver Capítulos 3 y 4). No son únicamente un claro reflejo de cómo se desarrolla un incendio, sino que también proporcionan datos indispensables para el cálculo de la radiación emitida por el frente, así como de las dimensiones de la superficie radiante, proporcionando una idea de la emisividad de las llamas (datos indispensables para la aplicación de los modelos matemáticos comúnmente empleados).

En la mayoría de los casos estas características son determinadas de forma visual, por lo cual se ocasiona un cierto error (por otra parte difícil de estimar). Suelen servir de ayuda equipos de captación de imágenes (cámaras de fotografía, video y termografía) con tratamiento de las mismas mediante ordenador. Pese al uso de equipo tan sofisticado, aun no se puede considerar que los datos obtenidos sean plenamente fiables. Sin embargo, dadas las características del fenómeno (turbulencias, fluctuación de la llama, cambio de forma) cabe pensar que difícilmente podrá avanzarse de forma significativa en este aspecto.

Por lo que corresponde a las ecuaciones propuestas para la estimación de tales parámetros geométricos, tampoco existe plena confianza en los resultados de las mismas. Esto es debido en gran medida a que los numerosos factores que afectan al fenómeno conducen frecuentemente a la proposición de ecuaciones empíricas (con validez en una gama de condiciones muy estrecha dentro de la gran cantidad de posibilidades del problema real). De todas estas ecuaciones, destaca la relación de Byram (1959) que, a pesar de haberse desarrollado para un solo tipo de combustible, sigue empleándose en muchos de los modelos de simulación actuales y continua siendo un punto de referencia en los trabajos de investigación. Cabe señalar que en las últimas décadas se ha intentado desarrollar modelos teóricos y rigurosos para la descripción de las características de la llama (Nelson, 1980; Albini 1981). Sin embargo como ya se ha comentado, el problema no está del todo resuelto.

A continuación, se presentan algunas de las expresiones existentes en la bibliografía (validadas en pruebas de laboratorio y de campo). Cabe señalar, de manera general, que la experimentación suele centrar su interés en el frente del incendio (por las condiciones extremas que le dan una mayor peligrosidad), aunque las correlaciones obtenidas para dicho frente también suelen aplicarse para la cola y los flancos. Nelson (1980) sugirió y propuso el desarrollo de expresiones distintas para el frente y la cola del incendio.

Correlaciones para Incendios de Superficie

<u>*Altura de la llama:*</u> Está directamente relacionada con la velocidad de propagación del incendio, con la cantidad de combustible y con la velocidad del viento.

De forma general se observa que:

- La relación entre la altura de la llama y la velocidad de propagación tiene una comportamiento parabólico de la forma:

$$H = a\,(u_{incendio})^b \tag{2.5}$$

donde *a* y *b* son dos exponentes dependientes de la velocidad del viento y de la altura de la vegetación.

- La altura de la llama disminuye de forma significativa con el aumento de la velocidad del viento.

- La altura de la llama se incrementa notoriamente con el aumento de la masa de combustible (la altura de la vegetación también tiene un papel importante).

En la tabla 2.1 se muestra una recopilación de las diferentes correlaciones encontradas para la estimación de la altura de un incendio de superficie.

Tabla 2.1. Correlaciones para estimar la altura de la llama en un incendio de superficie.

Autor	Ecuación	Núm.	Observaciones
McArthur (1966)	$H = 13 \cdot u_{incendio} + 0{,}24 \cdot m_c - 2$	(2.6)	$u_{incendio}$ en km/h y m_c en t/ha
Nelson (1980)	$H = I_B - \dfrac{47}{15444 \cdot u_{incendio}}$	(2.7)	
Albini (1981)	$H = \dfrac{k \cdot I_B}{\eta \cdot \rho_a \cdot Cp \cdot T_a \cdot u_a}$	(2.8)	K es la fracción pirolizada de combustible, η fracción del aire que se incorpora a la llama, $\rho_a Cp T_a$ es el calor por unidad de volumen del aire y u_a es la velocidad del viento a la mitad de la llama
Alexander (1982)	$H = Sen\omega \, L_f$	(2.9)	
Nelson y Adkins (1986)	$H = \dfrac{I_B}{385 \cdot u_a}$	(2.10)	

<u>*Longitud de la llama:*</u> La longitud de la llama es un parámetro que puede proporcionar una rápida estimación de la intensidad del incendio y, en consecuencia, ser un indicador de los efectos en la flora y la fauna, así como en las tareas de extinción (Rothermel, 1983). Para esta última aplicación, este autor relaciona la longitud de la llama con la intensidad lineal del frente de incendio, pudiendo utilizarse este criterio para sugerir posibles formas de ataque.

De acuerdo con Nelson (1980), las correlaciones empíricas obtenidas para la estimación de la longitud de la llama son de la forma:

$$L_f / S_f = K \left[\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g S_f}} \right]^n \tag{2.11}$$

donde

L_f longitud de la llama (m)
S_f Espesor o profundidad de la llama (m)
m'' velocidad de consumo de combustible por unidad de área ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)
ρ_a densidad del aire (kg/m^3)
g aceleración de la gravedad (m/s^2)
K constante que depende del tipo de combustible (-)
n exponente con valores cercanos a 2 / 3 (-).

En la tabla 2.2 se muestran algunas correlaciones propuestas en la bibliografía para la estimación de la longitud de la llama.

Tabla 2.2. Correlaciones para estimar la longitud de la llama en un incendio de superficie.

Autor	Ecuación	Núm.
Byram (1959)	$L_f = 0{,}0775 \cdot I_B^{0,46}$	(2.12)
Thomas (1963)	$L_f = \left[\frac{I_B}{229{,}97}\right]^{\frac{1}{1,5}}$	(2.13)
Nelson (1980)	Frente del incendio: $L_f = \left[\frac{I_B}{511{,}07}\right]^{\frac{1}{2}}$ Cola del incendio: $L_f = \left[\frac{I_B}{213{,}74}\right]^{\frac{1}{1,5}}$	(2.14)
Nelson y Adkins (1986)	$L_f = \left[\frac{I_B}{483{,}27}\right]^{\frac{1}{2,03}}$	(2.15)
Finney y Martin (1992)	$L_f = \left[\frac{H \cdot (\sin(90-\beta))}{(\sin(\psi-\beta))}\right]$. β ángulo de la pendiente respecto a la horizontal Ψ ángulo de la llama con respecto a la horizontal	(2.16)

<u>*Espesor o profundidad de la llama:*</u> Según Wilson (1982) este parámetro, además de presentar grandes dificultades para una determinación experimental exacta, no ha sido definido con precisión y no existe una definición estándar. A pesar de las anteriores observaciones, desde el punto de vista teórico representa una variable que complementa la caracterización de una llama y que puede aportar importante información en el proceso de modelización. Es por este motivo que diversos autores lo han estudiado, encontrando que el grueso de la llama está directamente relacionado con la cantidad de combustible disponible, con el contenido hídrico de dicho combustible y con la velocidad de propagación del incendio, guardando con este último parámetro una relación lineal (Trabaud, 1992).

La tabla 2.3 recoge las correlaciones que se encuentran en la bibliografía para estimar este parámetro. De entre estas expresiones, se ha observado que la ecuación de Leicester (1985)

proporciona valores muy altos. Por otra parte, la ecuación de Simard ha sido validada con trabajos experimentales de diferentes investigadores (Anderson, 1966; Rothermel y Anderson, 1966; Brown, 1972).

Tabla 2.3. Correlaciones para estimar el espesor de la llama en un incendio de superficie.

Autor	Ecuación	Número
Leicester (1985)	$S_f = 1{,}5 \cdot H$	(2.17)
Nelson y Adkins (1988)	$S_f = 0{,}39 \cdot \left(m_c^{'}\right)^{0{,}25} \cdot u_a^{1{,}51}$	(2.18)
Simard (1989)	$S_f = \sqrt{L_f^2 - H^2}$	(2.19)

Ángulo de inclinación de la llama: La mayoría de los parámetros geométricos de las llamas están obtenidos de forma totalmente empírica a partir de los datos experimentales. No obstante, para la determinación de este parámetro se han desarrollado también estudios con base teórica con una posterior comprobación experimental. Por ejemplo, Taylor (1961) aplicó teorías de flotación y movimiento de fluidos a los gases que conforman la columna de convección, obteniendo una expresión semiempírica. Posteriormente, Albini (1981) trató de forma más rigurosa la teoría propuesta por Taylor, obteniendo una expresión de validez más general empleando el número adimensional de Froude.

El resumen de las ecuaciones propuestas para la determinación de este parámetro se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Correlaciones para estimar el ángulo de inclinación de la llama en un incendio de superficie.

Autor	Ecuación	Núm.	Observaciones
Rankine (1950)	$\psi = arctg\left[C \cdot \left(\frac{I_B}{u_a^3}\right)^{0{,}28}\right]$	(2.20)	*C* es una constante de proporcionalidad que depende del tipo de combustible
Taylor (1961)	$\psi = arctg\left[C \cdot \left(\frac{I_B}{u_a^3}\right)^{0{,}5}\right]$	(2.21)	*C* es una constante de proporcionalidad que depende del tipo de combustible
Putnam (1965)	$\psi = arctg\left[2{,}24 \cdot \left(\frac{L_f}{u_a^2}\right)^{0{,}5}\right]$	(2.22)	
Albini (1981)	$\psi = arctg\left[0{,}820 \cdot \left(\frac{1}{Fr}\right)^{0{,}5}\right]$	(2.23)	
Nelson y Adkins (1986)	$\psi = arctg\left[0{,}388 \cdot \left(\frac{I_B}{u_a^3}\right)^{0{,}29}\right]$	(2.24)	

Correlaciones para incendios de copas

Debido a la dificultad que representa la realización de experimentación en incendios de copas, los datos con los que se cuenta son muy pocos; esto se refleja en la escasa información bibliográfica en cuanto a correlaciones para determinar las características geométricas de un incendio de este tipo. En muchas ocasiones se emplean las ecuaciones de los incendios de superficie, con lo cual se obtienen resultados con errores considerables dado el estrecho margen de aplicación que tienen las ecuaciones empíricas y semiempíricas.

Altura de la llama: Albini (1981), en uno de los trabajos teóricos más importantes sobre el estudio de la geometría del frente de un incendio, desarrolló una expresión genérica, obtenida teóricamente, para la estimación de la altura de las llamas. Esta ecuación muestra que la altura de las llamas, es directamente proporcional a la intensidad lineal e inversamente proporcional a la velocidad del viento:

$$H = A \cdot \frac{I_B}{u_a} \tag{2.25}$$

donde

A constante (m^3/kJ)
u_a velocidad del viento (m/s).

Posteriormente, Albini y Stocks (1986), a partir de valores medios de la altura de las llamas, la intensidad lineal y la velocidad del viento observada durante una serie de experimentaciones con incendios de copas realizados en el Canadá, determinaron el valor de la constante y propusieron la siguiente correlación:

$$H = 0{,}00618 \cdot \frac{I_B}{u_a} \tag{2.26}$$

Longitud de la llama: Byram (1959) adaptó la ecuación para longitudes de llama de incendios de superficie (2.12), proponiendo una nueva expresión; en la misma intentó, mediante un nuevo término (sumando), estimar el incremento en la altura de las llamas por causa del incendio de las copas de los árboles:

$$L_f = 0{,}0775 \cdot I_B^{0,46} + 0{,}5 \cdot h_c \tag{2.27}$$

donde

h_c altura de la copa (m).

Los valores de longitud de llama que se obtienen mediante esta ecuación son bajos cuando la intensidad lineal del frente supera los 5000 kW/m. Otra expresión empleada para la estimación de este parámetro (Van Wagner, 1968; Rothermel 1991) es la propuesta por Thomas (1963):

$$L_f = 0{,}0266 \cdot I_B^{2/3} \tag{2.28}$$

Los resultados obtenidos con la ecuación (2.28) son bastante aceptables, aunque cuando es aplicada a incendios con intensidades lineales bajas la longitud de llama que se obtiene está claramente subestimada (Rothermel, 1991), y para intensidades lineales superiores a 10000 kW/m puede proporcionar resultados incorrectos.

Otra expresión para la determinación de este parámetro es la desarrollada por Scott (1999), el cual propuso una combinación de las dos últimas ecuaciones:

$$L_f = L_{f_{Byram}} + CFB \cdot \left(L_{f_{\text{Thomas}}} - L_{f_{Byram}}\right) \tag{2.29}$$

donde

CFB fracción de combustible de copas consumido (-).

En el mismo trabajo se afirma que la ecuación puede dar resultados incorrectos en incendios de copas de antorcha.

<u>*Espesor y ángulo de inclinación de las llamas:*</u> En la bibliografía especializada no hay expresiones específicas para estas variables geométricas para incendios de copas.

Albini y Stocks (1986) emplearon la ecuación (2.23) para determinar el ángulo de inclinación de las llamas en este tipo de incendios.

En cuanto al espesor de las llamas, éste se puede determinar genéricamente para cualquier tipo de incendio si se conoce el tiempo de residencia de la llama, mediante la ecuación (2.4).

2.2.4. Transferencia de calor

Todo incendio presenta como una de las características principales la transferencia de calor. El calor provoca graves daños, intensifica el fuego, lo propaga, acrecienta su perímetro y crea el mayor obstáculo para la extinción del incendio. El tipo y la cantidad de calor transmitida influyen en la velocidad de propagación de un incendio; por otra parte, la combustión no se puede mantener sin una aportación continua de calor.

La transferencia de calor se efectúa mediante los tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. Estos tres mecanismos se presentan de forma simultánea en el transcurso de un incendio. Ahora bien, la importancia de cada uno varía en función de la intensidad y magnitud del incendio, así como de la configuración del sistema que lo envuelve.

Conducción

La conducción se considera como la transferencia de energía de las zonas de mayor temperatura a las de menor temperatura de una sustancia o medio debido a la interacción

molecular. Este tipo de mecanismo de transferencia de calor puede suceder en medios sólidos, líquidos o gaseosos.

En el caso de un sistema gaseoso, las temperaturas más altas se asocian con energías moleculares más altas; cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, tiene que haber una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción tiene que ir en la dirección de la temperatura decreciente.

La situación es semejante en los líquidos, aunque las moléculas están menos separadas y las interacciones entre ellas son más fuertes y frecuentes. Y lo mismo sucede en un sólido, en el que la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares. En un sólido poco conductor, la transferencia de energía se da exclusivamente mediante estas ondas reticulares; en un sólido conductor, la transferencia es debida también al movimiento de translación de los electrones libres.

Cuando un combustible sólido quema, la conducción - al contrario que la convección y la radiación, las cuales prácticamente transportan la energía desde la superficie del combustible - puede considerarse como un mecanismo de transporte de calor hacia el interior de cada una de las partes del combustible, teniendo en cuenta lo que se ha dicho en los párrafos anteriores. Así, cuando un bosque se incendia, se puede considerar hasta cierto punto como un medio conductor, propagándose una parte del calor por conducción hacia otras partes del combustible (troncos y ramas) más frías.

En los incendios forestales puede considerarse despreciable la aportación de calor al medio combustible (bosque) mediante el mecanismo de conducción (Chandler et al., 1983). Esta afirmación, aunque cierta en general, depende de la carga de combustible por dos razones: la primera es que como la madera tiene una elevada capacidad calorífica, cuanto más masa tenga más calor transmitido necesitará para iniciar su proceso de combustión; la segunda es que la madera es un mal conductor del calor y, por lo tanto, la transmisión por conducción es lenta, sobre todo cuando su espesor es considerable. Por estos dos motivos, cuando un bosque está formado por grandes masas de troncos y hojas el proceso de conducción de calor es mucho más lento que cualquiera de los otros mecanismos (convección y radiación). Ahora bien, si en el bosque hay material combustible de baja carga, como pequeñas ramas y residuos de humus de la descomposición de las hojas y la madera, la transmisión de calor por conducción en el medio es mucho más rápida y, por lo tanto, mucho más importante, por lo cual no puede despreciarse este mecanismo de transferencia de calor (Dupuy, 1997).

Por otra parte, la conducción es la responsable de qué, una vez que haya pasado el frente del incendio, troncos, ramas y otros materiales combustibles que han iniciado su proceso de combustión continúen quemando, ya que por el mecanismo de conducción el calor penetra hacia su interior; por lo tanto, es responsable de los incendios residuales que pueden volver a reactivar un incendio.

También se ha de tener en cuenta, que cuando un incendio transmite calor hacia otro medio, por ejemplo la pared de una casa u otra masa de bosque alejada del frente de llama, la transmisión de calor tendrá lugar mediante radiación o convección hasta la superficie de este medio, pero una vez haya llegado a la superficie la transmisión hacia el interior del medio será por conducción.

Uno de los principales objetivos en un análisis del mecanismo de conducción es conocer la distribución de temperaturas; es decir, cómo varía la temperatura con la posición a partir de la ley de Fourier.

Ley de Fourier: El modelo que describe la conducción de calor en un medio cualquiera (sólido, líquido o gas) se conoce como la ley de Fourier:

$$q_x = -\alpha \cdot \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial x} \tag{2.30}$$

donde

q_x flujo de calor por unidad de superficie (W/m^2)
α coeficiente de difusión térmica (m^2/s).

El coeficiente de difusión térmica, α, también puede escribirse de la forma siguiente:

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \tag{2.31}$$

donde

k conductividad térmica del medio ($W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$).

Por lo tanto, la ley de Fourier también puede expresarse de la forma siguiente:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.32}$$

El flujo de calor por unidad de superficie, q_x, es la velocidad con la que se transfiere el calor en la dirección x por unidad de área perpendicular a la dirección de la transferencia de este calor y es proporcional al gradiente de temperaturas, $\frac{\partial T}{\partial x}$, en la mencionada dirección. La conductividad térmica es, para cada medio, una propiedad intrínseca de transporte. El signo menos es una consecuencia del hecho de qué el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

Admitiendo que el flujo de calor es una cantidad vectorial, es posible escribir un planteamiento más general de la ecuación de conducción de la forma siguiente:

$$q'' = -k\nabla T = -k\left(\vec{i}\frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{2.33}$$

donde ∇ es el operador nabla.

Otra manera de representar el flujo de calor es:

$$q'' = \vec{i}\, q''_x + \vec{j}\, q''_y + \vec{k}\, q''_z \tag{2.34}$$

donde

$$q''_x = -k \frac{dT}{\partial x} \tag{2.35}$$

$$q''_y = -k \frac{dT}{\partial y} \tag{2.36}$$

$$q''_z = -k \frac{dT}{\partial z} \tag{2.37}$$

Los subíndices *x*, *y*, *z* indican la dirección del calor y las comillas (*''*), que es por unidad de área. Dicho de otro modo, la velocidad de flujo de calor a través de una superficie con el gradiente de temperaturas en la dirección *x*, *y*, *z* está dada por las ecuaciones (2.35), (2.36) y (2.37), respectivamente.

Cabe señalar algunas características a tener en cuenta de la ley de Fourier, como son:

- No es una ley que se derive de principios fundamentales de la termodinámica, sino una generalización que se basa en pruebas experimentales.
- Es una ley que define una propiedad importante como es la conductividad térmica.
- Puede aplicarse a toda la materia sin importar su estado.
- Es una expresión vectorial que indica que el flujo de calor es normal a superficies isotermas en la dirección de la temperatura decreciente.

Una herramienta útil para el estudio de la transferencia de calor en los incendios es la primera ley de la termodinámica (ley de la conservación de la energía). En un estudio completo, es necesario considerar todos los fenómenos de transporte (Masa, Cantidad de movimiento y Calor). La metodología consiste en:

- Definir un volumen de control finito o diferencial (figura 2.2.5. Nótese que en el primer caso, las expresiones resultantes determinan el comportamiento general del sistema).
- Identificar los procesos de energía relevantes.

- Introducir las ecuaciones de flujo apropiadas.

- El resultado son expresiones que, para el caso de un volumen de control finito, sirven para determinar el comportamiento general del sistema. En el caso de un volumen de control diferencial, se obtienen ecuaciones diferenciales que se resuelven para las condiciones existentes en cada punto del sistema

Siguiendo la metodología para el caso de la transferencia de calor por conducción, se podrán obtener ecuaciones diferenciales cuya solución, para las condiciones de contorno que se establezcan, proporcionará la distribución de temperaturas en el medio.

Considérese las velocidades de transferencia de calor por conducción perpendiculares a cada una de las superficies de control en las coordenadas x, y, z, que se indican con los términos q_x, q_y, q_z, respectivamente.

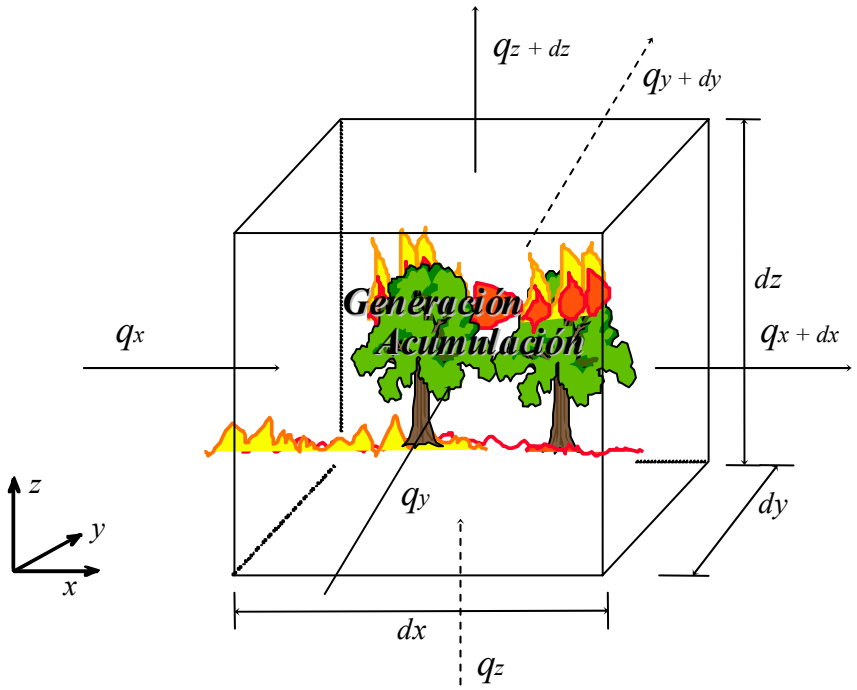

Figura 2.2.5. Volumen de control con los flujos de calor

Además, la velocidad de conducción de calor se puede evaluar a partir de la ley de Fourier, según:

$$q_x = -kdydz\frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.38}$$

$$q_y = -kdxdz\frac{\partial T}{\partial y} \tag{2.39}$$

$$q_z = -kdxdy\frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.40}$$

Las velocidades de transferencia de calor por conducción en las superficies opuestas se expresan como un desarrollo en series de Taylor, despreciando términos de orden superior:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \tag{2.41}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \tag{2.42}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \tag{2.43}$$

La ecuación (2.41) expresa que la velocidad de transferencia de calor en $x + dx$, es igual al valor de este componente en x más la cantidad por la que cambia con respecto a x veces dx.

Dentro del volumen de control puede haber un término generador de energía. Este término se representa como:

$$E_g = \dot{q}\, dx\, dy\, dz \tag{2.44}$$

Además, pueden ocurrir cambios en la cantidad de energía térmica almacenada en el volumen de control, lo que se puede representar como E_{alm}; cuando no existe cambio de fase, este término toma la forma siguiente:

$$E_{alm} = \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} dx\, dy\, dz \tag{2.45}$$

donde

$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} dx\, dy\, dz$ es la velocidad de cambio temporal de la energía sensible del medio por unidad de volumen.

Es importante advertir una vez más que los términos de generación y acumulación representan diferentes procesos físicos. El término de generación de energía está dado por la combustión de algún material, mientras que el término de almacenamiento de energía se refiere a la velocidad de cambio de la energía térmica almacenada por la materia. De la expresión general de conservación de la energía

$$E_{ent} + E_g = E_{sal} + E_{alm} \tag{2.46}$$

Si se introducen las ecuaciones anteriores en la ecuación (2.46), se obtiene:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q}\, dx\, dy\, dz = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} dx\, dy\, dz \tag{2.47}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.41) a (2.43) en la ecuación (2.47):

$$-\frac{dq_x}{dx}-\frac{dq_y}{dy}-\frac{dq_z}{dz}+\dot{q}\,dx\,dy\,dz=\rho\,Cp\frac{\partial T}{\partial t}dx\,dy\,dz \qquad (2.\ 48)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.38) a (2.40) en la ecuación (2.48) y haciendo la manipulación algebraica correspondiente, se obtiene finalmente la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho\,Cp\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2.49)$$

Esta ecuación es la forma general en coordenadas cartesianas de la ecuación de conducción de calor. Expresa que en cualquier punto dentro del medio (volumen de control), la velocidad de transferencia de energía por conducción en un volumen unitario más la velocidad de generación volumétrica de energía térmica debe ser igual a la velocidad de cambio de la energía térmica almacenada dentro del volumen.

A menudo, no se trabaja con todos los términos de dicha ecuación, efectuándose consideraciones que permitan su simplificación manteniendo aproximaciones aceptables.

Convección

Una gran parte del calor generado en los incendios se transmite por convección. Esta forma de transferencia de calor es una combinación de dos mecanismos: el de difusión debido al movimiento molecular aleatorio (conducción) y, esencialmente, el que transfiere energía mediante el movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento macroscópico del fluido se asocia al hecho de que, en cualquier instante, gran número de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Este movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas y el agregado mantienen su movimiento aleatorio; la transferencia total de calor se debe, por lo tanto, a una superposición del transporte de energía por difusión y del transporte de energía por el movimiento global del fluido.

El mecanismo de convección es el predominante cuando se transfiere energía entre los gases calientes desprendidos por un incendio y la superficie sólida del combustible, que se encuentra a diferente temperatura. Considérese el flujo del fluido sobre la superficie caliente de la figura 2.2.6. Una consecuencia de la interacción fluido - superficie es el desarrollo de una región en el fluido en la cual la velocidad de éste varía de cero en la superficie sólida de contacto a un valor finito u_f asociado al flujo. Esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica o de velocidad. Además, si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía de T_s en $y = 0$ a T_f en el flujo exterior. Esta región, denominada capa límite térmica, puede variar de dimensiones pero en cualquier caso, si $T_s > T_f$, ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior.

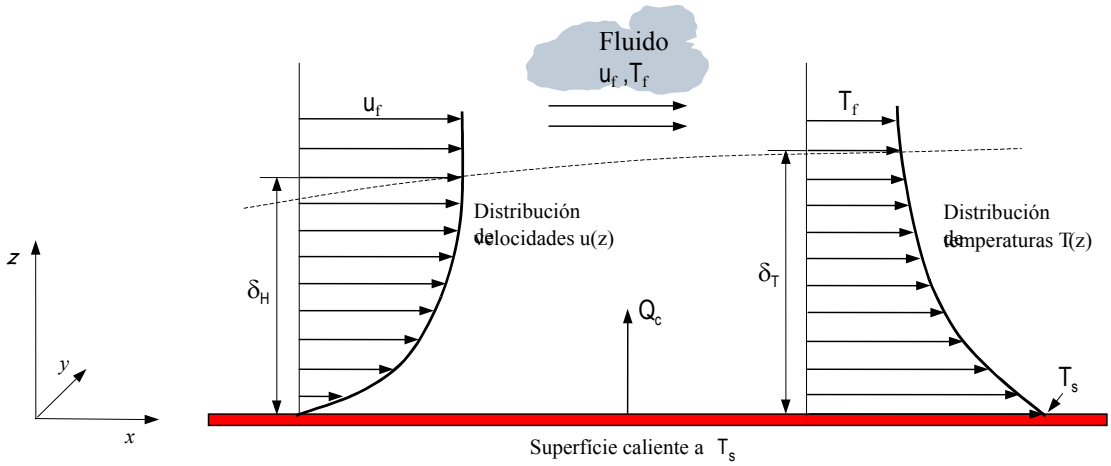

Figura 2.2.6. Desarrollo de la capa limite

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Habrá convección forzada cuando el flujo sea causado por medios externos. En el caso de los incendios (salvo en presencia de viento importante), la convección será natural, siendo el flujo inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura del fluido.

La ley de Newton es la expresión que se emplea para determinar la transferencia de calor por convección:

$$Q_c = h \cdot (T_s - T_f) \tag{2.50}$$

donde

Q_c calor transferido por convección por unidad de superficie (W/m^2)
h coeficiente de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
T_s temperatura de la superficie sólida (K)
T_f temperatura del fluido (K).

El coeficiente de transmisión de calor h generalmente se obtiene mediante correlaciones de resultados experimentales obtenidos en diferentes condiciones y empleando el análisis dimensional (Brodkey y Hershey, 1988). El resultado son expresiones empíricas que relacionan números adimensionales. La más general es la siguiente:

$$Nu = F(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}, Gr) \tag{2.51}$$

donde

Nu número de Nusselt (-)
Re número de Reynolds (-)
Pr número de Prandtl (-)
Gr número de Grashof (-).

Los valores de los números adimensionales dependerán de las condiciones en las que sucedan los incendios. Dos de las ecuaciones de este tipo, que permiten calcular el coeficiente de transferencia de calor desde un incendio suponiendo éste como una superficie horizontal plana, son las siguientes:

- para convección forzada en régimen laminar, ($Re_X < 5 \cdot 10^5$) (Incropera y DeWitt, 1999):

$$Nu = 0{,}332 \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_x^{1/2} \tag{2.52}$$

- para convección forzada y régimen turbulento, ($Re_X \geq 3 \cdot 10^5$) (Casal et al., 1999):

$$Nu = 0{,}037 \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_x^{4/5} \tag{2.53}$$

Radiación

La radiación es el mecanismo que transmite, juntamente con la convección, la mayor parte de energía calorífica de un incendio. Sumado a la convección, es el mecanismo que calienta al combustible mucho antes de que el fuego haya llegado. Diferentes autores (Rothermel y Anderson, 1966; Van Wagner, 1968) han considerado este mecanismo como el máximo responsable del precalentamiento de los combustibles cuando avanza un frente de llama en un incendio forestal.

Se define como radiación térmica a la energía electromagnética emitida por la materia cuando se encuentra a una temperatura finita en la región espectral de longitud de onda λ comprendida entre 0,4 μm y 100 μm. La radiación puede provenir tanto de los sólidos, como de los líquidos y gases. De hecho, las llamas de un incendio son una mezcla de gases (CO_2, CO, H_2O) y de cenizas incandescentes. Para gases y para sólidos semitransparentes, la emisión es un fenómeno volumétrico. Es decir, la radiación que emerge de un volumen finito de materia es el efecto integrado de la emisión local a través del volumen. Sin embargo, la falta de información, adicionalmente a la complejidad del conjunto de fenómenos que suceden (Ozisik, 1985), suele conducir a simplificar el estudio de los mismos y suponerse situaciones para las que la radiación es un fenómeno superficial. Aunque también es cierto que en la mayoría de los sólidos y líquidos, la radiación emitida desde las moléculas interiores es fuertemente absorbida por las moléculas adyacentes. En consecuencia, la radiación que se emite desde un sólido o líquido se origina de moléculas que se encuentran a una distancia de aproximadamente 1 μm con respecto de la superficie (Incropera y DeWitt, 1999).

Sin importar la forma de la materia, la radiación puede atribuirse a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos de esta materia. La energía por radiación se transporta por ondas electromagnéticas (o, alternativamente, fotones). Y como se puede observar en la figura 2.2.7, tienen una longitud de onda comprendida en un intervalo que abarca desde la parte de radiación ultravioleta hasta las microondas, pasando por todo el espectro visible y el infrarrojo (λ = 0,4 a 100 μm). Por tanto, mientras que la conducción y la convección requieren de un medio para transmitirse, la radiación no lo necesita. De hecho, la transferencia de energía por radiación tiene su máxima eficacia en el vacío.

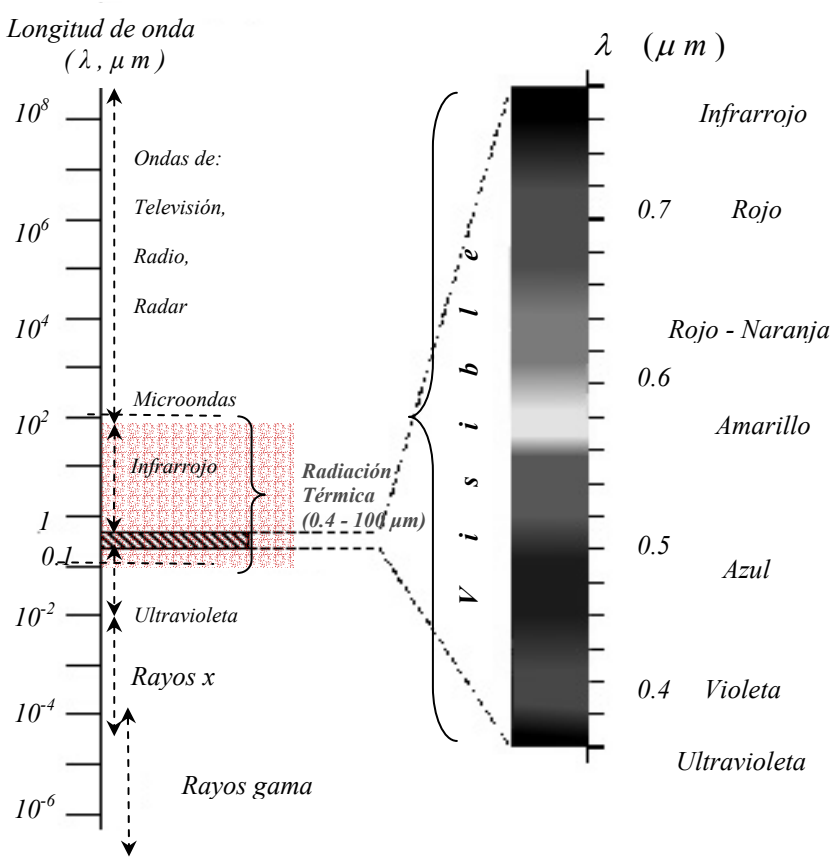

Figura 2.2.7 Espectro de radiación electromagnética

La magnitud de la radiación varía de acuerdo con la longitud de onda. La radiación emitida consiste en una distribución continua no uniforme de componentes monocromáticos (una sola longitud de onda). La distribución espectral (figura 2.2.8) y la distribución direccional son dos características importantes de la radiación térmica.

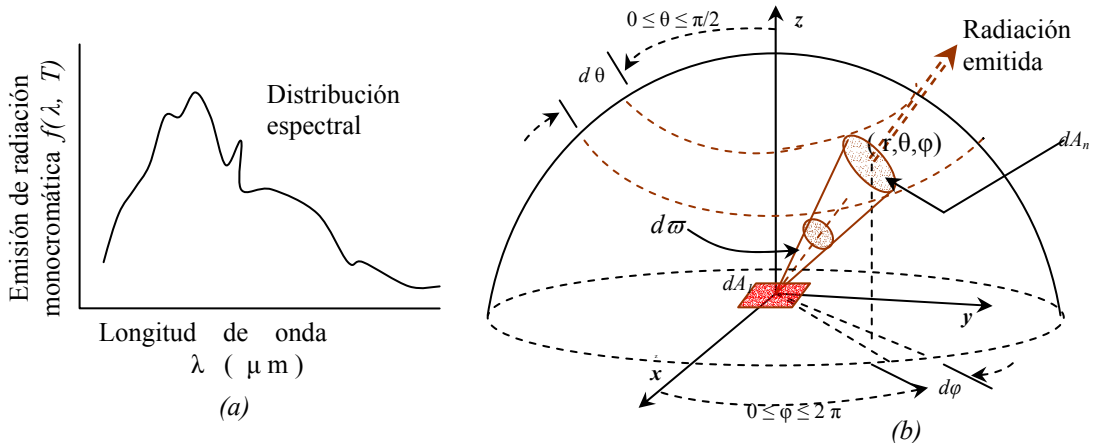

Figura 2.2.8. Características de la radiación. a) Distribución espectral. b) Sistema de coordenadas esféricas para definir la naturaleza direccional de la intensidad espectral en un hemisferio hipotético de elementos diferenciales dA_1 y dA_n.

<u>*Intensidad de radiación:*</u> Los efectos direccionales se encuentran considerados en el concepto de intensidad de radiación ($I_{\lambda,e}$). Ésta se define como la velocidad a la que se emite energía radiante a la longitud de onda λ en la dirección (θ,φ), por unidad de área de la superficie emisora normal a esta dirección, por unidad de ángulo sólido alrededor de esta dirección, y por intervalo de longitud de onda unitaria $d\lambda$ alrededor de λ. Su ecuación es:

$$I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\varphi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos\theta \cdot d\varpi \cdot d\lambda} \tag{2.54}$$

donde

$I_{\lambda,e}$	intensidad espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)
λ	longitud de onda (μm)
$d\varpi$	ángulo sólido (sr)
$dA_1 \cos\theta$	área proyectada (m^2).

Si se considera $dq/d\lambda \equiv dq_\lambda$ y se reordena la expresión 2.54, se obtiene:

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\varphi)\, dA_1 \cos\theta \; d\varpi \tag{2.55}$$

donde dq_λ tiene unidades de W/μm.

<u>*Potencia emisiva:*</u> La intensidad espectral se relaciona con la *potencia espectral emisiva hemisférica* mediante la siguiente expresión:

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\varphi) \cos\theta \cdot sen\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \tag{2.56}$$

La potencia espectral emisiva hemisférica E_λ ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) representa la intensidad a la que se emite radiación de longitud de onda λ en todas direcciones desde una superficie, por unidad de longitud de onda dλ alrededor de λ y por unidad de superficie.

Obsérvese que E_λ es un flujo que se basa en el área superficial real, mientras que $I_{\lambda,e}$ se basa en el área proyectada.

La potencia emisiva total hemisférica o potencia emisiva total E (W/m^2), es la rapidez a la que se emite radiación por unidad de área en todas las longitudes de onda y en todas las direcciones posibles. Su expresión es:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)\, d\lambda \tag{2.57}$$

Sustituyendo (2.56) en (2.57) se obtiene:

$$E = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\varphi) \cos\theta \cdot sen\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \cdot d\lambda \tag{2.58}$$

Cuando se integra la densidad de energía para todas las longitudes de onda, la energía total emitida es proporcional a la temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. El resultado es la ley de Stefan – Boltzmann

$$E_b = \sigma T_s^4 \tag{2.59}$$

donde

E_b poder emisor (W/m^2)
σ constante de Stefan - Boltzmann (5,67·10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4})
T_s temperatura de la superficie radiante (K).

La ecuación (2.59) permite el cálculo de la cantidad de radiación emitida en todas direcciones y sobre todas las longitudes de onda, simplemente a partir del conocimiento de la temperatura del radiador ideal o cuerpo negro. Ahora bien, el flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura. Por tanto, el poder emisor de un cuerpo gris está dado por:

$$E = \varepsilon \, \sigma \, T_s^4 \tag{2.60}$$

donde

ε emisividad ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) (-).

Como se puede intuir, la emisividad es una propiedad que proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Su valor es función del material de la superficie y del acabado de la misma (características superficiales del material; longitud de onda, λ; temperatura, T; ángulos, θ, φ). Para superficies sólidas toma valores de 0,8 ± 0,2, mientras que para las llamas depende del grosor de las mismas. En la mayoría de los casos suele simplificarse y hacer la suposición de una llama "gruesa" (grosor > 2 m) y en consecuencia $\varepsilon = 1$. Sin embargo, para el calculo exacto de la emisividad en un incendio, deberá tomarse en cuenta el hecho de que las llamas no son un emisor ideal y que la emisividad será el resultado del efecto combinado de variaciones en la temperatura de la llama, cambios en la concentración y recorrido de todos los productos de la combustión (cenizas, vapor de agua, monóxido y dióxido de carbono); esto dificulta y complica la obtención de resultados exactos (Mudan y Croce, 1990).

La aproximación general para el cálculo de la emisividad de una mezcla de gases y cenizas está dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta\varepsilon_{c,w} \tag{2.61}$$

donde

ε_s, ε_w , ε_c, representa las emisividades de la ceniza, el vapor de agua y del dióxido de carbono, respectivamente
$\Delta\varepsilon_{c,w}$ factor de corrección por la superposición de las bandas de emisión del CO_2 y H_2O

Los valores de la emisividad de los gases que aparecen en la ecuación (2.61) se pueden encontrar tabulados en Hotel y Sarofim (1967). Alternativamente, cuando se conoce el grosor de la llama, la emisividad puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-KS_f) \tag{2.62}$$

donde

K coeficiente de extinción (m^{-1})
S_f grosor de la llama (m).

El coeficiente de extinción es una propiedad característica de cada llama y representa la cantidad de energía que se absorbe y luego se dispersa, en el momento en que la radiación atraviesa un medio determinado. Las correlaciones propuestas para la obtención de la emisividad incluyen parámetros empíricos y muchas suposiciones, por lo tanto los resultados siguen siendo aproximaciones de los valores reales de un incendio.

Irradiación: Otra parte importante de las propiedades de la energía de radiación se encuentra en el estudio de la incidencia en una superficie (figura 2.2.9).

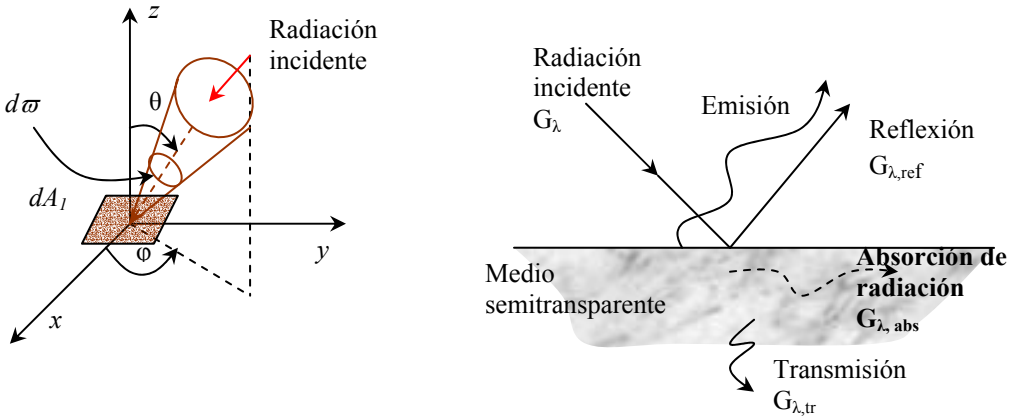

Figura 2.2.9. Características de la radiación incidente o irradiación. a) Sistema de coordenadas esféricas empleado para definir la naturaleza direccional de la radiación incidente. b) Efectos que acompañan a la radiación incidente.

La intensidad de radiación incidente se puede relacionar con un flujo denominado irradiación espectral, G_λ ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$), el cual se define como la velocidad a la que la radiación de longitud de onda λ incide sobre una superficie, por unidad de área de la superficie y por intervalo de longitud de onda unitaria $d\lambda$ alrededor de λ. Su ecuación es:

$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\varphi)\cos\theta \, sen\theta \, d\theta \, d\varphi \tag{2.63}$$

donde senθ $d\theta$ $d\varphi$ es el ángulo sólido unitario.

La irradiación total (W/m^2) representa la velocidad a la que incide la radiación por unidad de área desde todas las direcciones y en todas las longitudes de onda:

$$G = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) d\lambda \tag{2.64}$$

En la figura 2.2.9 (b) se aprecian las propiedades asociadas en un medio semitransparente a la irradiación: reflectividad ρ (fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie), absortividad α (fracción de la radiación incidente absorbida) y transmisividad τ (fracción de la radiación incidente transmitida). Las mismas (como en el caso de la emisión de energía) se caracterizan por su dependencia direccional y espectral. Es deseable, pues, encontrar

expresiones para ambas distribuciones sin olvidar otra que integre a ambas (denominada hemisférica total). En la tabla 2.5 se resumen las expresiones que las definen.

Tabla 2.5. Expresiones que definen a la absortividad, reflectividad y transmisividad en superficies

Distribución / Propiedad	Direccional espectral $f(\lambda,\theta,\varphi)$	Hemisférica espectral $f(\lambda)$	Hemisférica total
Absortividad	$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\varphi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)}$ (2.64)	$\alpha_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$ (2.65)	$\alpha \equiv \frac{G_{abs}}{G}$ (2.66)
Reflectividad(1)	$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda,\theta,\varphi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)}$ (2.67)	$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$ (2.68)	$\rho \equiv \frac{G_{ref}}{G}$ (2.69)
Transmisividad	-	$\tau_{\lambda} = \frac{G_{\lambda,tr}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$ (2.70)	$\tau = \frac{G_{tr}}{G}$ (2.71)

(1) La reflectividad es una propiedad que, además de depender de la dirección de la radiación incidente, depende también de la dirección de la radiación reflejada. Por tanto, suele emplearse un promedio de la radiación reflejada, sin proporcionar información sobre la distribución direccional de esta radiación.

Parte del análisis básico que se realiza en un sistema como el mostrado en la figura (2.2.9. b) consiste en la aplicación de un balance de la energía irradiada:

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,\mathrm{ref}} + G_{\lambda,\mathrm{abs}} + G_{\lambda,\mathrm{tr}} \tag{2.72}$$

El balance con respecto a las propiedades queda de la forma siguiente:

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \tag{2.73}$$

Cuando se incluyen valores promedio sobre todo el espectro, el subíndice referente a la longitud de onda puede eliminarse (dado que la ecuación seria valida para todo el espectro). Por otra parte, no se ha de perder de vista que una simplificación común es la consideración de fenómenos superficiales, cuando en la realidad se tienen sistemas volumétricos (figura 2.2.10).

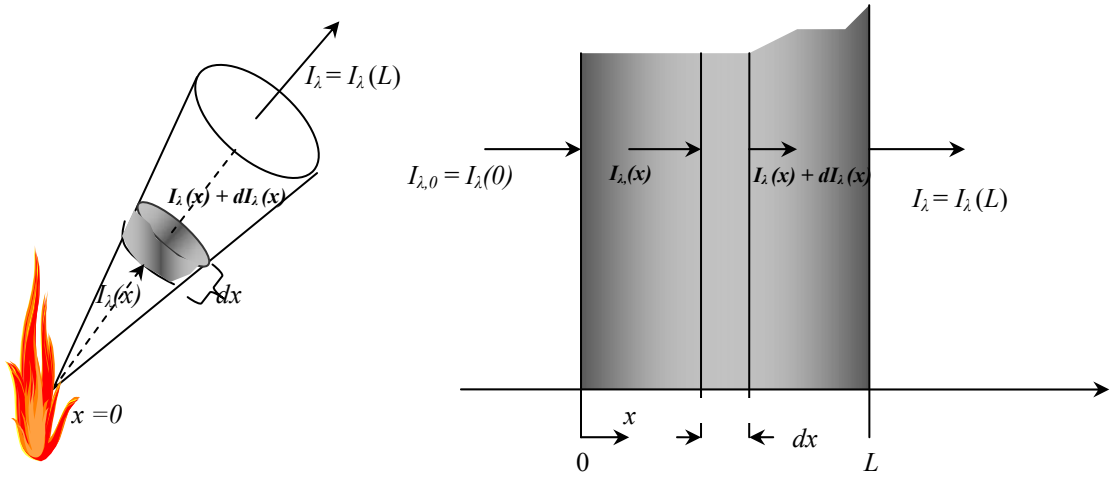

Figura 2.2.10. Absorción de radiación en un medio semitransparente

Si un haz monocromático de intensidad espectral $I_{\lambda,0}$ incide sobre un medio semitransparente (gas, líquido, sólido o mezcla), la intensidad en $I_{\lambda,L} = I_\lambda(L)$ se reducirá debido a la absorción en el medio. La reducción que tiene lugar en una capa infinitesimal dx se puede expresar como:

$$dI_\lambda(x) = K_\lambda I_\lambda(x)dx \tag{2.74}$$

donde

K_λ es el coeficiente de absorción (m^{-1})
L espesor del medio (m).

Separando variables e integrando sobre todo el espesor, se obtiene:

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,L}} \frac{dI_\lambda(x)}{I_\lambda(x)} = -K_\lambda \int_0^L dx \tag{2.75}$$

El coeficiente K_λ se supone independiente de x. Resolviendo la integración anterior:

$$\frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-K_\lambda L} \tag{2.76}$$

Dicha expresión es conocida como ley de Lambert-Beer. Al relacionarla con la definición de transmisividad se obtiene:

$$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-K_\lambda L} \tag{2.77}$$

Por lo que la absortividad puede expresarse de la siguiente manera:

$$\alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda = 1 - e^{-K_\lambda L} \tag{2.78}$$

Nótese que esta expresión tiene la forma de la ecuación 2.62. Esta ecuación exponencial muestra cómo cuando L tiende a ∞ la transmisividad y la emisividad se aproximan a la unidad. Es decir, la irradiación de energía sobre una capa muy gruesa de material semitransparente será absorbida, de tal forma que α_λ será muy próxima a 1. Por otra parte, una llama de un grosor ($S_f = L \rightarrow \infty$) muy grande tendrá una emisividad muy próxima a la unidad.

Factor de vista: El intercambio de energía radiante entre múltiples superficies durante un incendio conduce a la consideración de las características geométricas. El factor de vista (también conocido como factor de configuración, de forma, de apariencia, o de intercambio de radiación) considera el tamaño, forma, orientación y separación de las superficies emisoras y receptoras.

El factor de vista F_{ij} se define como la fracción de la radiación emitida desde la superficie i que es interceptada por la superficie j (Incropera y DeWitt, 1999). Los elementos que lo constituyen se muestran en la Figura 2.2.11. Supóngase dos áreas diferencial dA_i y dA_j, conectadas por una línea imaginaria de longitud R que forma con las normales $\boldsymbol{n}_i$ y $\boldsymbol{n}_j$ los ángulos polares θ_i y θ_j. De la definición del factor de vista:

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i J_i} \tag{2.79}$$

donde

J representa la radiación total (W/m^2).

Se entiende por radiación total a la velocidad con que sale la radiación desde una superficie debido a la emisión y reflexión en todas direcciones por unidad de área de la superficie (véase figura 2.2.9).

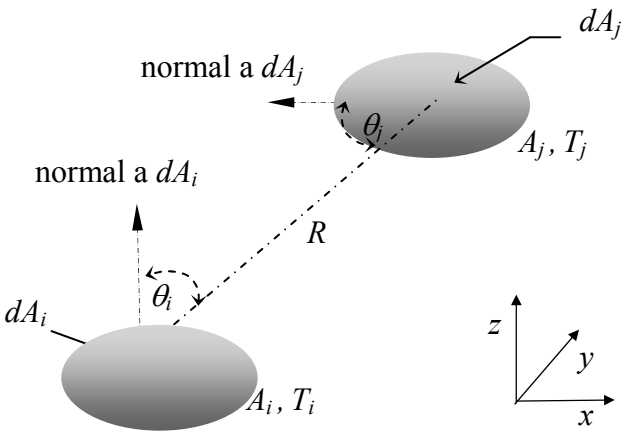

Figura 2.2.11. Posición de la superficie radiante y de la superficie irradiada

La representación algebraica del factor de vista está dada por la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{Ai} \int_{Aj} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.80}$$

De forma similar, el factor de vista F_{ji} se define como la fracción de la radiación emitida por A_j que es interceptada por A_i ; su expresión es:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{Ai} \int_{Aj} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.81}$$

Estas expresiones pueden ser evaluadas de forma analítica o numérica. Ambos métodos pueden generar resultados significativamente diferentes, sobre todo en geometrías complejas, que ocasionan errores en la manipulación de ecuaciones complicadas y/o en la resolución por efecto del redondeo (Dunkle, 1963; Hsu, 1967; Feingold, 1966; Gross, 1981; Ehlert, 1993; Rao, 1996). A pesar de que en la bibliografía (McGuire, 1953; Siegel y Howell, 1992; Howell, 2001; Rohsenow et al., 1998; Ozisik, 1985; Hamilton y Morgan, 1952) se encuentran numerosas expresiones analíticas para el cálculo del factor de vista de geometrías más comunes, su aplicación en el campo de los incendios forestales es limitada. Esto es debido a que varias de las suposiciones que deben ser realizadas en un sistema (bosque) ideal no suelen ser acordes con la realidad. En resumen, se puede afirmar que en la actualidad no existe un método general para la obtención de los factores de vista de manera exacta (Rao, 1996).

En los capítulos 3 y 4 se incluye información complementaria referente a los modelos matemáticos de la transferencia de calor en los incendios forestales.

2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS INCENDIOS

El comportamiento de un incendio forestal es, evidentemente, función de las condiciones en las que sucede el fenómeno. El combustible, el clima, la meteorología, la topografía, con sus posibles combinaciones, son los principales factores que influyen y determinan tal comportamiento.

2.3.1. Características del combustible

El combustible es uno de los factores más importantes y muchas veces es decisivo para el comportamiento del incendio. Basta recordar que es uno de los componentes del conocido “triángulo del fuego”.

Las propiedades extrínsecas más importantes (aquellas que cambian de acuerdo con la cantidad que se considere) y que afectan a la intensidad y velocidad de propagación, son:

Carga de combustible

La carga de combustible se define como la cantidad de combustible (en base seca) por unidad de superficie; se puede encontrar expresada en diferentes unidades como toneladas por hectárea (t/ha), toneladas por acre (t/a), libras por pie cuadrado (lb/ft^2) o kilogramo por metro cuadrado (kg/m^2).

Forma y tamaño del combustible

Se puede afirmar que la forma y el tamaño son las características geométricas más importantes del combustible. La forma se refiere al aspecto (cilíndrica, esférica, irregular, etc.). El tamaño, al grueso, ancho y largo. Estos parámetros suelen presentarse mediante la relación superficie/volumen (expresada normalmente con la letra σ y las unidades de m^2/m^3).

De manera general, se observa que el tiempo de ignición decrece conforme el tamaño del combustible decrece (conforme σ aumenta) y que la velocidad de propagación de un incendio varía directamente con el valor de σ (Rothermel y Anderson 1966).

Para determinar la relación superficie/volumen en combustibles cuya forma se puede asociar a un cilindro (forma alargada), puede emplearse la siguiente ecuación:

$$\sigma = 4 / d \tag{2.82}$$

donde

σ	relación superficie/volumen (m^2/m^3)
d	diámetro (m).

Compactación y densidad aparente

La compactación se refiere al espacio existente entre el material combustible. Suele darse en términos de densidad aparente (*bulk density*), masa de combustible vegetal por unidad de volumen (la densidad aparente es siempre menor que la densidad del material, ya que esta última no incluye el aire existente entre las partículas). Trabaud (1992) define la compactación como el inverso de la porosidad.

La compactación afecta tanto a la ignición como a la combustión. Con una compactación alta, la velocidad de propagación suele ser más lenta (debido a la falta de oxígeno).

El espacio entre partículas también determina el tipo de mecanismo de transferencia de calor. Si las partículas se encuentran separadas, la radiación y la convección serán los mecanismos más importantes; si la distancia es aun más grande, la radiación será el mecanismo controlante, aunque hasta un cierto limite, dado que después de éste la energía puede no ser suficiente para continuar la combustión.

Disposición del combustible

La disposición del combustible se refiere a la distribución de la vegetación sobre el terreno, tanto desde el punto de vista de un plano horizontal como de un plano vertical.

La simplificación para ambas disposiciones se encuentra en la continuidad o discontinuidad del material combustible; en ambos casos; la ausencia de combustible significa la interrupción de la combustión y la presencia del mismo garantiza la propagación. Por otra parte, el tipo de incendio (de subsuelo, de superficie o de copas) también depende de la distribución del combustible.

Existe una extraordinaria variabilidad en la disposición del combustible, tipo, forma, tamaño, compactación, por lo que es necesaria una clasificación del mismo. La forma más común de realizar esta clasificación es mediante una descripción generalizada del combustible en los denominados modelos de combustibles (Rothermel, 1972; Albini, 1976; Deeming et al., 1977; Andrews, 1986; Forestry Canada Fire Danger Group, 1992). De dichas clasificaciones, la más conocida es la propuesta por Rothermel (1972). Y a pesar de que dicha clasificación responde a las necesidades de los Estados Unidos, con pequeñas adaptaciones es frecuentemente utilizada en numerosos países. En este sentido, para la aplicación del modelo americano en la península Ibérica, el Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) ha adoptado los 13 modelos de combustible de Rothermel, modificando únicamente la descripción fotográfica. En la tabla 2.6 se presenta una breve descripción.

Tabla 2.6 Descripción simplificada de los modelos de combustible de Rothermel (1972)

Grupo	Modelo	Descripción
Pastos	1	Pasto fino, seco y bajo, que recubre completamente el suelo. El matorral o arbolado se encuentra disperso y ocupa menos de un tercio del área. Carga de combustible (materia seca): 1-2 t/ha.
	2	Pasto fino, seco y bajo, que recubre completamente el suelo. El matorral o arbolado ocupa de uno a dos tercios de la superficie. Carga de combustible (materia seca): 5-10 t/ha.
	3	Pasto grueso, denso, seco y alto (más de 1 metro). Puede haber algunas plantas leñosas dispersas. Los campos de cereales son representativos de este modelo. Carga de combustible (materia seca): 4-6 t/ha.
Matorral	4	Matorral o plantación joven densa, con alturas próximas a 2 m. Carga de combustible (materia seca): 23-35 t/ha.
	5	Matorral denso y joven de menos de 1 m de altura. Poco material muerto. Carga de combustible (materia seca): 5-8 t/ha.
	6	Matorral similar al modelo 5, pero de alturas superiores a 1 m o con restos de cortas de frondosas. Carga de combustible (materia seca): 10-15 t/ha.
	7	Matorrales de especies muy inflamables con alturas de menos de 2 m o pinares de sotobosque. Carga de combustible (materia seca): 10-15 t/ha.
Hojarasca bajo arbolado	8	Bosque denso o frondosas con hojarasca compacta y poco matorral. Carga de combustible (materia seca): 10-12 t/ha.
	9	Similar al modelo 8 pero con hojarasca menos compacta. Carga de combustible (materia seca): 10-12 t/ha.
	10	Bosques con material leñoso caído como consecuencia de cortas, vientos, plagas, etc. Carga de combustible (materia seca): 30-35 t/ha.
Restos de corta y operaciones silvícolas	11	Bosque claro o fuertemente aclarado. Restos de poda o zonas claras con plantas herbáceas rebrotando. Carga de combustible (materia seca): 30-35 t/ha.
	12	Predominio de los restos sobre el arbolado. Restos de poda cubriendo todo el suelo. Carga de combustible (materia seca): 50-80 t/ha.
	13	Grandes acumulaciones de restos de más de 76 mm de diámetro cubriendo todo el suelo. Carga de combustible (materia seca): 100-150 t/ha.

Cabe añadir que en esta sección no se han incluido las características intrínsecas, debido a que el efecto macroscópico del incendio se observa principalmente con los parámetros anteriormente descritos. No obstante, características intrínsecas de los combustibles tales como poder calorífico, composición química, densidad, conductividad térmica, etc. son igualmente importantes para un estudio completo del fenómeno de combustión (Pyne, 1996; Trabaud, 1992; Chandler, 1983).

2.3.2. Clima y meteorología

Tanto el clima como la meteorología aportan información sobre un conjunto de variables que ejercen una influencia determinante durante el transcurso de un incendio forestal.

El clima afecta básicamente de dos formas. En primer lugar porque determina la duración y la dureza de las estaciones más secas y calurosas en un área geográfica determinada y, en segundo lugar, los periodos climáticos condicionan el tipo y cantidad de combustible presente en la zona (Chandler, 1983).

La variabilidad y el escaso seguimiento de los factores meteorológicos agregan una enorme complejidad al estudio de su relación con los incendios forestales. Sirva como ejemplo el comportamiento de la presión y temperatura en las capas atmosféricas, cuya influencia repercute directamente en las corrientes de aire y, en consecuencia, en los incendios.

Los factores climatológicos que tienen mayor influencia son los siguientes:

Radiación solar

De la energía requerida en todos los procesos naturales que suceden en la superficie de la tierra, el 99.97 % proviene del sol. Los rayos solares son los responsables directos del posible aumento en la temperatura del aire, humedad relativa, humedad y temperatura del combustible. Todo lo anterior tiene un efecto inmediato en la inflamabilidad de los combustibles.

La intensidad de la radiación solar es mayor cuando la superficie terrestre es perpendicular a los rayos solares (factor de vista óptimo). La perpendicular sobre la superficie variará con la época del año, la hora del día y la latitud. Esto es lo que determina que un incendio pueda variar su comportamiento de acuerdo con la hora del día, época del año o las características topográficas. Lo que por la mañana puede ser un incendio de superficie en una ladera, por la tarde puede llegar a ser un incendio de copas. Después de la puesta del sol, el mismo incendio puede llegar a ser un incendio de superficie con intensidades de llama que permitan acciones exitosas de extinción. Algunos trabajos que estudian el efecto de este factor están aplicados en modelos de simulación (Albini, 1982).

Humedad relativa

La humedad relativa del aire influye en el comportamiento del incendio en la medida en que determina la humedad del combustible; por consiguiente, cuanto menor es la humedad relativa del aire, el contenido hídrico de los combustibles será menor y, en consecuencia quemaran con mayor facilidad.

Viento

Los efectos del viento sobre el incendio son extremadamente complejos debido a la fluctuación de velocidad y dirección. De forma general, cuanto mayor es la velocidad del viento mayor serán la intensidad y la velocidad de propagación. En la figura 2.3.1 se muestra el efecto del viento sobre el incendio. La inclinación y el alargamiento de las llamas favorecen el transporte de calor, debido al aumento del factor de vista y la disminución de la distancia entre la llama y el combustible o incluso provocando el contacto. El flujo que conlleva la propagación de una llama está compuesto por dos componentes: una horizontal y otra vertical. El flujo vertical es el más significativo, no tanto porque la llama esté inclinada sobre el combustible (con un incremento de la radiación), sino por el contacto directo de la llama y del transporte de calor por convección hacia el potencial combustible (Rothermel 1972).

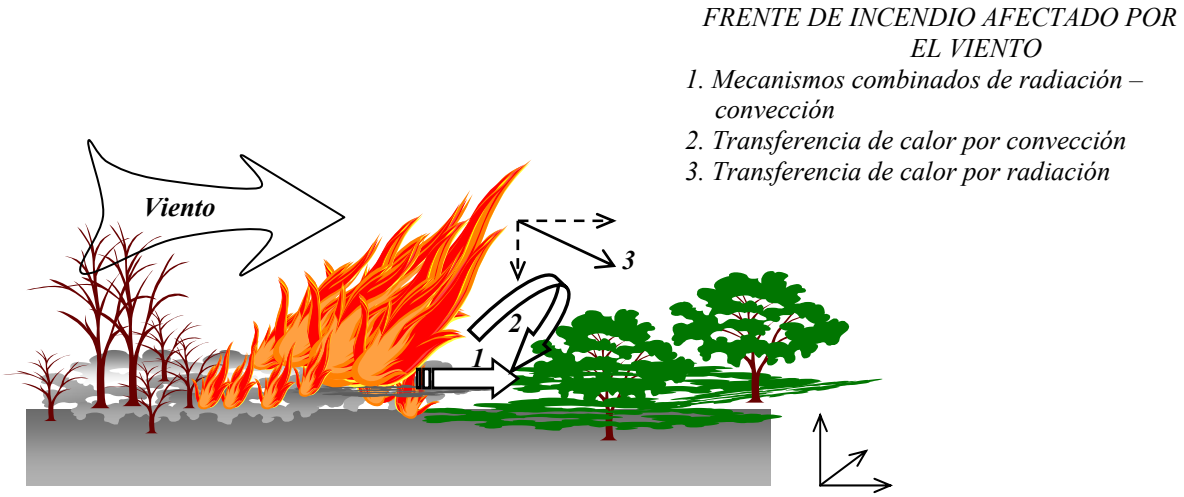

Figura 2.3.1. Efecto del viento en el frente de un incendio.

Por otra parte, el viento, además de aportar mayores cantidades de oxígeno a la reacción (lo que la hace más eficiente), deseca la vegetación y desplaza chispas desde la llama. Por tanto, tiene un claro efecto sobre la morfología y la gravedad del incendio.

2.3.3. Topografía

La topografía es otro de los factores que más influyen en el comportamiento del incendio, tanto por sus efectos directos que favorecen la transferencia de energía, como por aquellos

que se puedan considerar indirectos y que condicionan algunas características de la vegetación y la climatología.

Si se comparan los factores ambientales, los topográficos son los factores más constantes y, en consecuencia, su influencia sobre el fuego es más fácil de prever. Los parámetros topográficos que afectan de forma importante al comportamiento del fuego son:

Pendiente

Los efectos de la pendiente y el viento son similares (Pyne, 1996; Trabaud 1992). La diferencia principal radica en la influencia sobre la velocidad de propagación: mientras que un incendio con fuertes corrientes de viento puede extenderse 100 veces más rápido que en ausencia de viento, la correspondiente influencia de la pendiente no excede un factor de 20 (Viegas, 1998). Normalmente la pendiente se calcula en grados o en porcentaje (una pendiente con un ángulo de 45^0 equivale a un 100 % en porcentaje).

Desde luego, no hay una situación única y el resultado dependerá de las fuerzas que participen en el fenómeno. Normalmente, tal como se muestra en la figura 2.3.2, las corrientes de viento fluyen cuesta arriba impulsando las llamas en esta misma dirección. Aunque también se presenta el caso inverso (Fig. 2.3.2 (d)), es decir, que un fuerte viento puede impulsar un incendio cuesta abajo. En la figura 2.3.2 (a) la columna de convección se desplaza de forma paralela a la pendiente sobre una distancia considerable, mientras que en la figura 2.3.2. (b) se desplaza paralelamente hasta el momento en que encuentra una discontinuidad en el terreno, lo cual favorece, en este punto la presencia de llamas de gran altura; en la figura 2.3.2 (c) se observa que la columna se separa de la superficie elevándose inmediatamente, lo cual ocasiona llamas más verticales y, dependiendo de las condiciones puede crear una situación propicia para incendiar las copas de los árboles.

La influencia conjunta de pendiente y viento ha sido ampliamente estudiada en diversos centros de investigación (Rothermel, 1972; Albini, 1976 y 1982; Van Wagner,1977 y 1988; Dupuy, 1997; Viegas, 1994 y 1998).

Exposición

La exposición se refiere a la orientación o posición de las laderas o pendientes. Este factor incide en el comportamiento del incendio por las variaciones de viento y radiación solar que reciben dichas laderas.

En el hemisferio norte se observa como norma general que las laderas orientadas al sur (solanas) reciben una mayor cantidad de radiación solar durante el año y, por tanto, tienen mayor temperatura, menos humedad y menos vegetación (combustible); por tanto, unas condiciones más favorables para el inicio y propagación de los incendios. En el hemisferio sur sucede lo contrario.

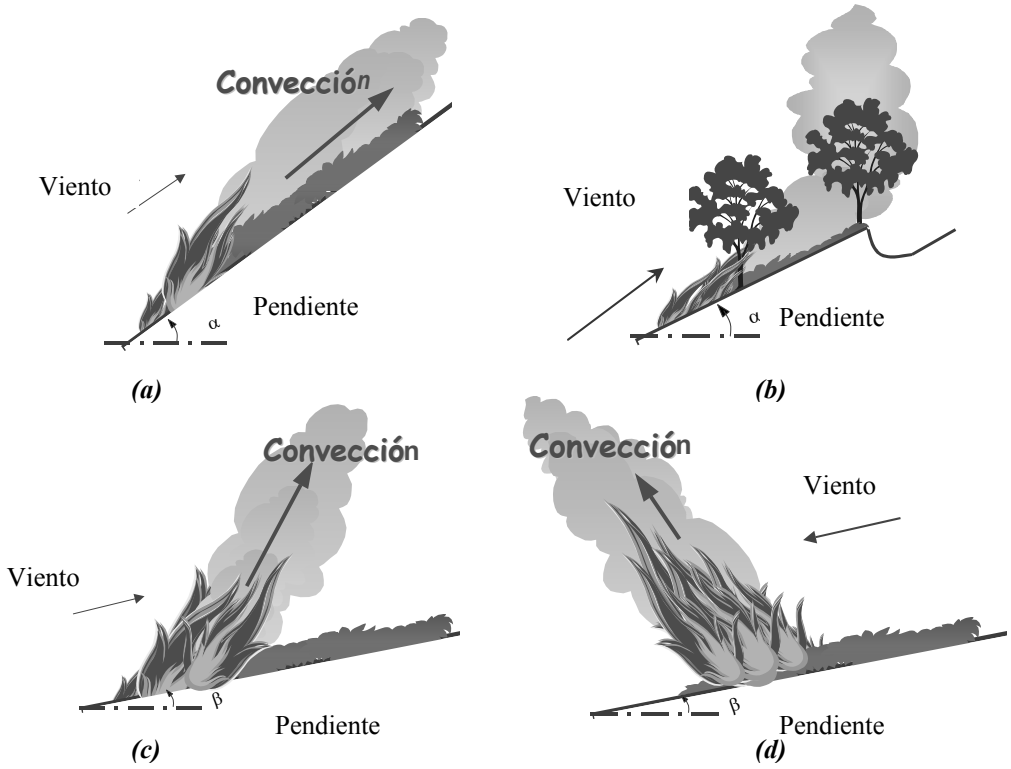

Figura 2.3.2. Efecto de viento y pendiente sobre la propagación del incendio.

Configuración o relieve

La configuración, relieve o forma que presenta el terreno considera la presencia de cañadas, barrancos, valles, crestas, collados, barreras naturales o artificiales. Tiene importancia por la gran influencia en los regímenes de viento que, a su vez, influyen de manera determinante en la dirección y velocidad de propagación del fuego. Por otro lado, también condiciona la formación de microclimas. Algunas de estas configuraciones son objeto de especial mención:

<u>*Cañones estrechos o barrancos:*</u> afectan al comportamiento del incendio porque actúan como un conducto de aire que, aunado a la pendiente, favorece la rápida propagación. Esta forma topográfica permite la irradiación al extremo opuesto, con el consiguiente precalentamiento del combustible, de tal forma que una mínima causa (una chispa o una brasa) sea motivo suficiente para el inicio del incendio en este otro extremo. Esta situación puede ocurrir lentamente, o ser tan rápida que un período de minutos sea suficiente para incendiar toda una ladera.

<u>*Barreras:*</u> éstas pueden ser naturales o artificiales, en dichas barreras se incluyen rocas, ríos, lagos, superficies sin vegetación, suelos húmedos, caminos, senderos, cambios en el tipo de combustible y en las condiciones de humedad del mismo y áreas previamente quemadas. La acción de extinción, frecuentemente, también crea barreras.

<u>*Efecto chimenea:*</u> tal como sugiere su nombre, este efecto presenta unas características topográficas de forma claramente estrecha, similar a la boca de un cañón o como un conducto

con combustible vegetal en las paredes. Normalmente, el aire fluye hacia arriba como en el caso de una chimenea, arrastrando partículas, precalentando e irradiando energía a través del cañón. El efecto chimenea ocurre cuando las condiciones inestables del aire en la superficie crean una corriente de convección a través del cañón, arrastrando el aire de la base a la parte alta. Tal situación es de gran riesgo, y en las tareas de extinción ha causado la muerte de bomberos.

Elevación

La elevación sobre el nivel del mar no es un factor determinante, aunque debe tenerse en cuenta por sus efectos sobre el clima local y otros parámetros ya mencionados, tales como:

Temperatura y humedad relativa: las cuales varían con respecto a la altura. La diferencia entre la profundidad de un valle y la parte superior de una de las montañas puede ser significativa.

Cinturón térmico: Es un área relativamente caliente situada en la mitad de una pendiente. De noche, la temperatura de esta zona puede ser más caliente que cualquier otro punto (por arriba o por debajo de la pendiente). La experiencia indica que este cinturón térmico posee las temperaturas más altas y los más bajos valores de humedad relativa. Esto es significativo porque, mientras los puntos por arriba o por abajo de esta zona permanecen estables durante la noche, este punto puede estar muy activo.

Vegetación: al haber cambios de temperatura y humedad se tienen cambios en las especies vegetales de acuerdo con la altura.

Viento: de forma general, el viento se incrementa con la altitud (sus efectos ya han sido comentados en párrafos anteriores).

2.4. CONSIDERACIÓN FINAL

La descripción de los diversos aspectos fenomenológicos que intervienen en los incendios forestales pone de manifiesto su extraordinaria complejidad. La gama de posibilidades que afectan a este tipo de incendios es extraordinariamente amplia: tipo de combustible (árboles, matorral, etc.), condiciones del terreno (pendiente, vaguadas, etc.) y condiciones meteorológicas (humedad, velocidad del viento) hacen sumamente difícil la modelización de este fenómeno.

Las propiedades del combustible y la influencia del terreno aumenta extraordinariamente la complejidad de los incendios forestales cuando se los compara con los incendios de hidrocarburos (tan importantes en la industria química que, por el intenso estudio al que han sido sometidos, podrían contribuir al marco de referencia para un tratamiento cuantitativo). Así mismo, el continuo desplazamiento del frente de llama sobre un terreno de condiciones

variables constituye un elemento diferencial respecto a otros tipos de incendio, contribuyendo a complicar aún más la modelización.
Es evidente por tanto que, si bien es factible una aproximación cuantitativa basada en los métodos ingenieriles usados en la modelización del fuego en otros campos, la misma estará sometida a las limitaciones originadas por estos condicionantes.

2.5. NOMENCLATURA

A	Constante en la ecuación 2.25, m^3/J; área, m^2
C	Constante de proporcionalidad, -
CFB	Fracción de combustible de copas consumido, -
Cp	Calor específico, J $kg^{-1}K^{-1}$
d	Diámetro, m
D_c	Diámetro de la partícula de combustible, cm
E	Energía, J; potencia emisiva, W/m^2; transferencia de energía en un volumen de control, W
E_b	Poder emisor, W/m^2
E_λ	La potencia espectral emisiva hemisférica, $W/m^2 \cdot \mu m$
F	Factor de vista, -
Fr	Número de Fraude, -
G	Irradiación, W/m^2
g	Aceleración de la gravedad, m/s^2
Gr	Número de Grashof, -
H	Altura de la llama, m
h	Coeficiente de transferencia de calor, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_c	Altura de la copa del árbol, m
ΔH_c	Poder calorífico inferior del combustible, kJ/kg
HR_{aire}	Humedad relativa del aire, %
i	Vector unitario
I_B	Intensidad lineal, kW/m
$I_{\lambda,e}$	Intensidad espectral, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
J	Radiosidad, W/m^2
j	Vector unitario
K	Constante que depende del tipo de combustible en la ecuación 2.11, -
k	Conductividad térmica, W m^{-1} K^{-1}
L	Espesor del medio, m
L_f	Longitud de la llama, m
m''	Velocidad de consumo de combustible por unidad de área, $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
m'_c	Masa de combustible quemado por unidad de superficie, kg/m^2
n	Exponente con valores cercanos a 2 / 3, -.
Nu	Número de Nusselt, -
p	Vector unitario
Pr	número de Prandtl, -

q_x Flujo de calor por unidad de superficie, W/m^2

Q_c calor transferido por convección por unidad de superficie, W/m^2

Re Número de Reynolds, -

S_f Espesor de la llama, m

T Temperatura, K

T_a Temperatura, K

t_b Tiempo de extinción, min

T_f Temperatura del fluido, K

t_R Tiempo de residencia de la llama en las partículas de combustible, s

t_r Tiempo de residencia del frente de llama, s

T_s Temperatura de la superficie sólida, K

$u_{incendio}$ Velocidad de avance lineal del frente del incendio, m/s

u Velocidad, m/s

u_a Velocidad del viento, m/s

x Coordenadas en la dirección x; distancia, m

y Coordenadas en la dirección y

z Coordenadas en la dirección z

Letras griegas

α Coeficiente de difusión térmica, m^2/s; absortividad, -

β Ángulo de la pendiente respecto a la horizontal, °

ε Emisividad, -

ϕ Ángulo acimutal, rad

K Coeficiente de extinción, m^{-1}

K_λ Coeficiente de absorción, m^{-1}

θ Ángulo cenital, rad

ρ Densidad, kg/m^3; reflectividad, -

ρ_a Densidad del aire, kg/m^3

σ Relación superficie/volumen de la partícula de combustible, m^{-1}; constante de Stefan – Boltzmann, 5,67·10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4}

λ Longitud de onda, μm

τ Transmisividad, -

ω Ángulo sólido, sr

Ψ Ángulo de la llama respecto a la horizontal, °