

CAPITULO 5

MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

5.1. INTRODUCCIÓN

La predicción de la energía de radiación que es emitida en los incendios forestales tiene como principales objetivos:

- El establecimiento de zonas de seguridad de personas (bomberos y población en general), edificios, material, equipo o cualquier bien que se quiera resguardar en una zona de riesgo.
- Su utilización en los modelos de propagación existentes (ya que la radiación se considera uno de los flujos de energía más significativos).

Con respecto a las zonas de seguridad, en los trabajos publicados hasta la actualidad suelen darse una serie de consejos prácticos para evitar pérdidas humanas y materiales, aunque en su mayoría sólo de manera descriptiva, sin incluir propuestas en las que se expongan métodos prácticos y cuantitativos de aplicación inmediata que sean una herramienta en la toma de decisiones.

En este capítulo se establecen los criterios que se deben considerar en la modelización matemática y, mediante el análisis de las variables más importantes, se observan las limitaciones del modelo del cuerpo sólido, que posteriormente se aplicará a la determinación de zonas de seguridad. Finalmente, se efectúa un estudio comparativo de las diversas expresiones existentes para el cálculo del factor de vista, relacionándose las más adecuadas para la posterior estimación de la radiación térmica procedente de los incendios.

5.2. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

Para el establecimiento de zonas de seguridad es necesario cuantificar la energía de radiación emitida por el incendio forestal, así como la fracción de energía que puede recibir un cuerpo localizado a una determinada distancia de las llamas.

Los pasos para la cuantificación de la energía de radiación se muestran mediante el algoritmo de la Figura 5.2.1:

- 1.- El primer paso consiste en definir el problema, es decir, las características concretas del incendio considerado. Para ello suele ser necesario el establecimiento de restricciones y/o suposiciones específicas del mismo. En la Figura 5.2.2 se resumen diversas situaciones que se presentan con frecuencia en un incendio forestal y que son de interés en relación con la determinación de las zonas de seguridad.
- 2.- Se supone una geometría para el sistema considerado, definiendo parámetros como: tamaño y forma del frente de llama, distancia con respecto al punto de interés y la superficie del elemento receptor.
- 3.- Adquisición o estimación de otros parámetros (temperaturas, emisividad, transmisividad, características de la atmósfera existente entre la superficie emisora y la receptora). En ocasiones, el desconocimiento de esta información puede resolverse mediante el uso de correlaciones apropiadas.

4.- Se elige el método y/o técnica para la determinación del factor de vista. Es posible que sea necesario establecer suposiciones adicionales.

5.- Finalmente, se determina el flujo de calor por radiación.

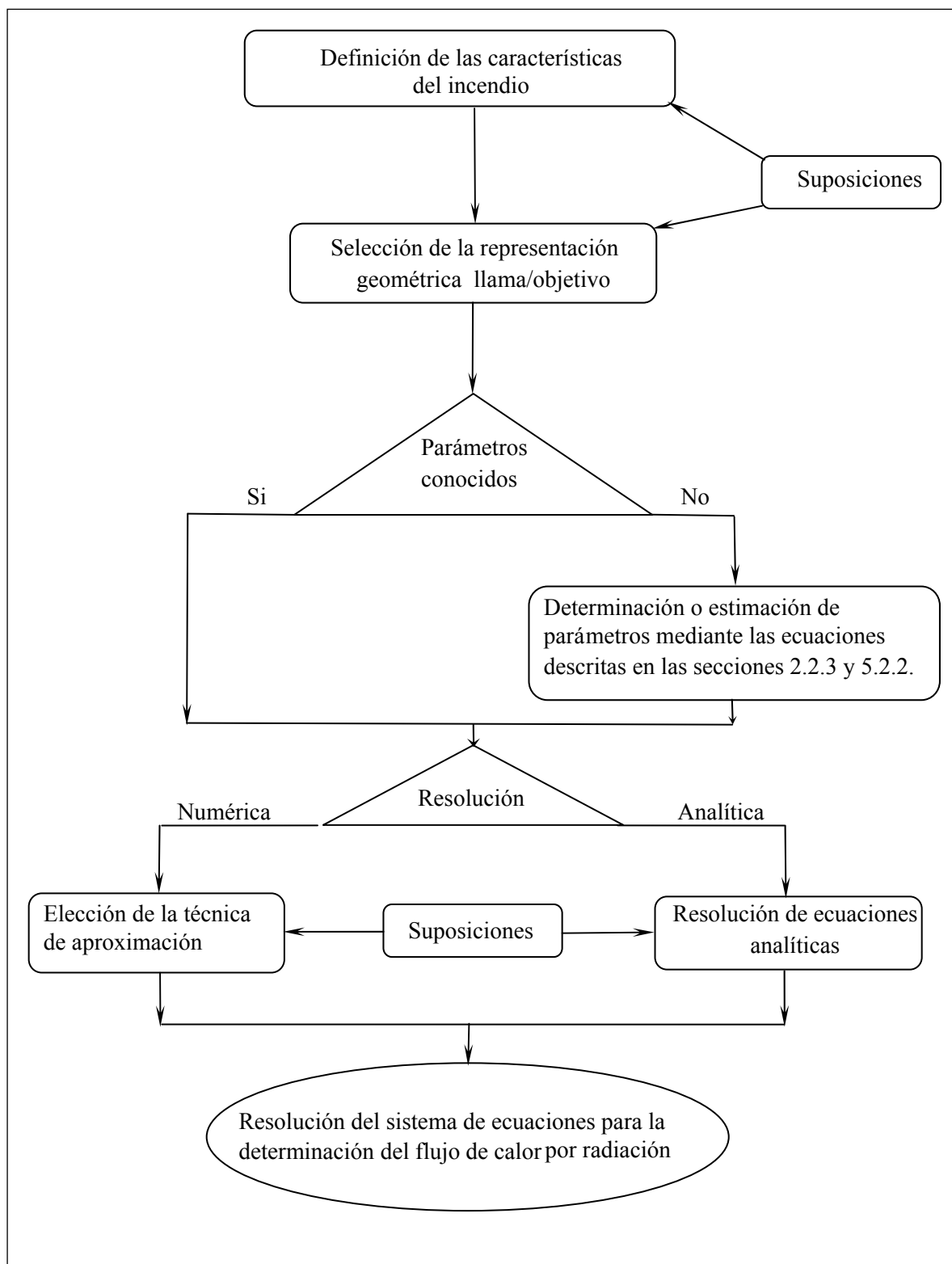


Figura 5.2.1. Algoritmo para la determinación del flujo de radiación en un incendio forestal

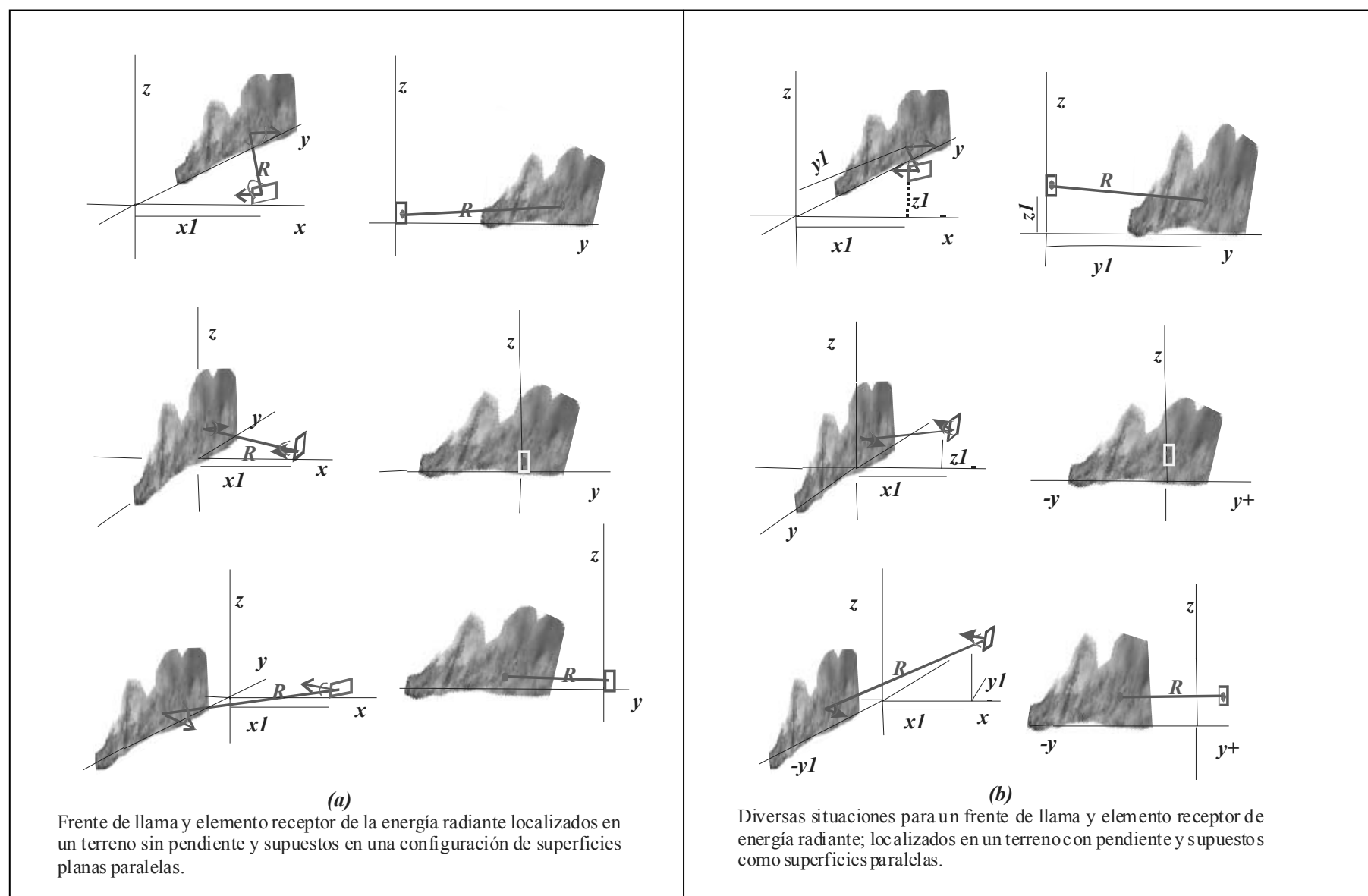


Figura 5.2.2. Representación de diversas configuraciones que relacionan el frente de llama y un elemento receptor en diferentes situaciones que pueden presentarse en un incendio forestal.

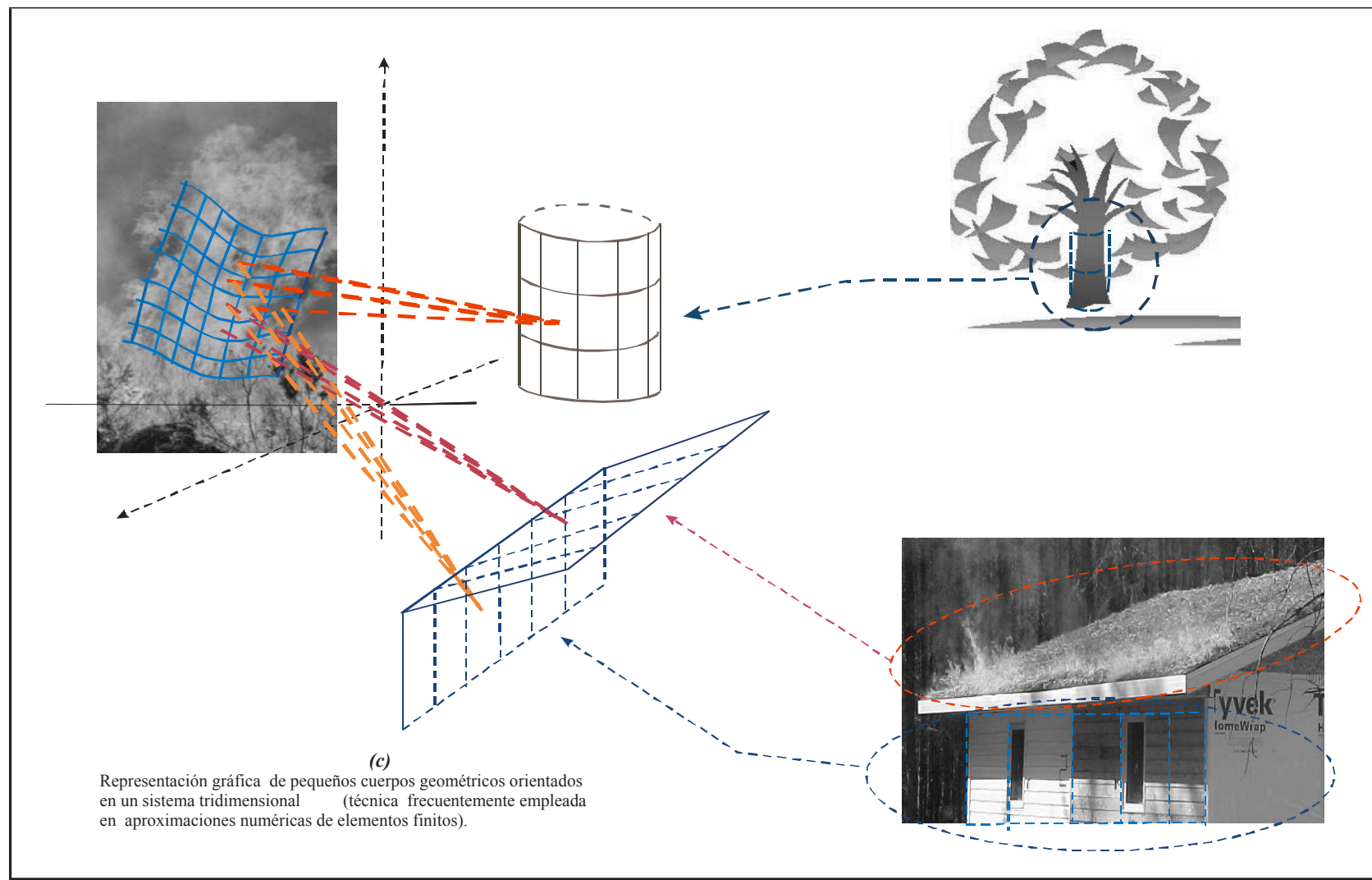


Figura 5.2.2. Continuación

El análisis llevado a cabo de las diversas metodologías existentes ha puesto de manifiesto el interés de los modelos semiempíricos como el de la fuente puntual o el del cuerpo sólido.

El modelo de la fuente puntual, interesante por su gran simplicidad, presenta el grave inconveniente de su poca precisión a las distancias significativas en el caso de los incendios forestales. No se ha considerado, por tanto, apto para la modelización matemática de los mismos (de todas formas, se adjunta una breve descripción de este modelo).

El modelo del cuerpo sólido, en cambio, presenta unas características que lo hacen muy interesante. No obstante, esta metodología ha sido muy poco utilizada para la predicción del comportamiento térmico (radiación térmica) de los incendios forestales, habiendo preferido la mayoría de autores que han trabajado en este campo la aplicación de otros enfoques.

Sin embargo, dicho modelo se ha mostrado recientemente de gran utilidad para la representación de incendios de balsas de hidrocarburo de gran tamaño (Chatris, 2001; Chatris *et al.*, 2002).

La participación del autor en la experimentación citada (incendios de balsas de combustible de hasta 28 m²) le ha permitido observar la gran similitud existente entre el comportamiento de la llama en estos incendios y en los incendios forestales, con todos los elementos que les caracterizan y que les presentan como un fenómeno complejo en su modelización matemática: extremada turbulencia de la llama, variabilidad de sus dimensiones y de su forma, etc. Es por esto que se ha decidido en la presente tesis doctoral, dado el enfoque ingenieril bajo el que se trata el comportamiento térmico de estos incendios, basar la modelización matemática en la teoría del cuerpo sólido, atendiendo a las principales características de dicho modelo:

- Relativa simplicidad
- Exigencia de información reducida y asequible
- Fiabilidad a las distancias de interés práctico en el caso de los incendios forestales
- La adaptación al caso de los incendios forestales es relativamente sencilla.

Estas características lo convierten en un modelo de gran interés para su aplicación a la predicción de los efectos térmicos en este tipo de incendios.

5.2.1. Modelo de fuente puntual

En este modelo, excesivamente simplista para determinadas aplicaciones, se asume que la fuente que da origen al calor de radiación es un punto, de manera que el flujo Q_r esta dado por:

$$Q_r = \frac{E}{4\pi x^2} \quad (5.1)$$

donde

Q_r flujo de calor transmitido por radiación por unidad de superficie (W/m²)

E poder emisivo de la llama (W)
 x distancia entre la fuente emisora y el receptor (m).

Para las llamas de un incendio, el poder emisivo, E , está dado por la siguiente expresión:

$$E = \phi_a m \Delta H_c \quad (5.2)$$

donde

ϕ_a fracción de energía de combustión liberada en forma de radiación (-)
 m velocidad másica de combustión (kg/s)
 ΔH_c calor de combustión (J/kg).

La exactitud en las predicciones obtenidas está directamente relacionada con los parámetros asumidos: localización del punto emisor, orientación de la superficie receptora, absorción atmosférica de la radiación y fracción de energía de combustión liberada en forma de radiación.

La principal ventaja de este modelo radica en la sencillez del mismo; en contraste, posee limitaciones importantes. Primeramente, que la fracción de energía de combustión liberada (el parámetro más importante del modelo) no puede ser estimada fácilmente de manera teórica, por lo que normalmente se emplean valores empíricos que para el caso de hidrocarburos se encuentran tabulados. La segunda limitación se encuentra en la sobreestimación que se da a la intensidad de radiación térmica para receptores localizados cerca del incendio (Mudan y Croce, 1990); la suposición de un foco puntual se encuentra muy alejada de la realidad, pudiendo considerarse válida únicamente a distancias considerables, (es decir, en situaciones en las que la radiación incidente sobre un determinado objetivo es muy reducida y, por tanto, carente de interés).

5.2.2. Modelo del cuerpo sólido.

Este modelo considera la llama visible como un cuerpo geométrico que emite energía térmica uniformemente en toda su superficie. La mezcla no visible de gases se desprecia como fuente emisora de radiación. Esto se fundamenta en pruebas experimentales, cuyos resultados confirman que las partes no visibles emiten menos del 10 % de la radiación media emitida por las llamas visibles de la pluma.

El flujo de radiación térmica, Q_r , sobre un objeto receptor situado a una distancia x de las llamas, se estima mediante la siguiente expresión:

$$Q_r = E_p \tau F \quad (5.3)$$

donde

E_p poder emisivo medio de la llama (W/m²)
 τ transmisividad atmosférica (-)
 F factor de vista (-).

En general, las predicciones de este modelo son aceptables, aunque los resultados podrán diferir debido a los diversos procedimientos existentes para la estimación de los parámetros que componen el modelo. Por otra parte, las características y el comportamiento de las llamas en un incendio real cuestionan varias de las suposiciones del mismo. En general, no se cumple la simplificación en dos dimensiones de un fenómeno mucho más complejo de tres dimensiones (la radiación emitida no es un fenómeno superficial y si volumétrico). A continuación, se describen brevemente los parámetros que aparecen en la ecuación (5.3).

Poder emisor de la llama (E_p)

Se define como la cantidad de calor emitida en forma de radiación por unidad de superficie. Suponiendo que la llama se comporta de manera turbulenta, que no es un emisor ideal (es un cuerpo gris), que la temperatura se conoce o se puede estimar y de acuerdo con la ecuación (2.60), se tiene la siguiente expresión:

$$E_p = E_b \varepsilon \quad (5.4)$$

donde el poder emisor del cuerpo negro, E_b , puede determinarse mediante la ecuación:

$$E_b = \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (5.5)$$

La emisividad, ε , ya ha sido comentada en el apartado 2.2.4.

Así mismo, el poder emisor de la llama puede estimarse mediante expresiones semiempíricas y, para determinadas sustancias, se encuentra tabulado.

Transmisividad atmosférica

Se define como la fracción de radiación térmica que es transmitida por la atmósfera. Es decir, contabiliza la fracción de energía que no es absorbida o dispersada por el medio existente entre la fuente emisora y el objeto receptor de la radiación. En un incendio, los principales constituyentes atmosféricos que absorben la energía térmica son el vapor de agua y el dióxido de carbono. Por lo que la transmisividad suele calcularse en función de la absorbancia del agua y del dióxido de carbono mediante la siguiente expresión:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (5.6)$$

donde

α_w absorbancia del vapor de agua (-)

α_c absorbancia del CO₂ (-).

Las absorbancias del vapor de agua y del dióxido de carbono se determinan a partir de las siguientes relaciones:

$$\alpha_w = \varepsilon_w \left[\frac{T_a}{T_f} \right]^{0.45} \quad (5.7)$$

$$\alpha_c = \varepsilon_c \left[\frac{T_a}{T_f} \right]^{0,65} \quad (5.8)$$

donde

ε_w emisividad del vapor de agua (-)
 ε_c emisividad del CO₂ (-)
 T_a temperatura ambiente (K).

Normalmente, los valores de las emisividades del vapor de agua y del dióxido de carbono se estiman mediante los gráficos publicados por Hottel y Sarofim (1967). Sin embargo, con la utilización de estos gráficos se presenta el problema de la imprecisión. Por esta razón se sugiere el uso de ecuaciones algo más precisas. La Tabla 5.1 recoge algunas de las ecuaciones propuestas a tal efecto.

Tabla 5.1. Correlaciones para determinar la transmisividad atmosférica.

Autor	Ecuación	No.	Referencia	Observación
Raj	$\tau = \log[14,1H_R^{-0,108}x^{-0,13}]$	(5.9)	CCPS (1992)	$x \leq 500$ m
Raj modificado	$\tau = 1,389 - 0,135 \log(\bar{p}_w x)$	(5.10)	Satyanarayana et al. (1991)	
TNO modificado	$\tau = 2,02(\bar{p}_w x)^{-0,09}$	(5.11)	Satyanarayana et al. (1991)	
Brzustowski y Sommer	$\tau = 1,304(H_R x)^{-1/16}$	(5.12)	Scanpower (1992)	
MHAU	$\tau = 1 - 0,058 \ln x$	(5.13)	Satyanarayana et al. (1991)	
Lihou y Maund	$\tau = \exp(-0,0007x)$	(5.14)	CCPS (1992)	
Moorhouse y Pritchard	$\tau = 0,998^x$	(5.15)	CCPS (1992)	$x \leq 300$ m

Factor de vista.

Como ya ha sido definido (ecuación 2.79), el factor de vista es la fracción del flujo de energía de radiación emitida por una superficie radiante que incide directamente (sin reflexión) sobre una superficie receptora.

Desde la perspectiva de aplicación del modelo del cuerpo sólido, es necesario un análisis de varios de los parámetros definidos en la sección 5.2.2 y en la sección 2.2. La importancia de lo anterior se explica al observar la influencia del comportamiento de estas variables sobre la predicción de los resultados. Por otra parte, tal análisis pone de manifiesto algunas de las limitaciones en la aplicación del modelo. Puede considerarse también, como un complemento a la información proporcionada en las secciones respectivas.

5.3. Características de la llama de un incendio forestal

Un sencillo análisis de la ecuación 5.3 muestra como una parte fundamental para la exactitud en los resultados obtenidos mediante el modelo del cuerpo sólido se encuentra relacionada con las variables que caracterizan a la llama (temperatura, emisividad, geometría). Por otra parte, dichas características presentan un comportamiento fluctuante con respecto al tiempo y al espacio, lo que ocasiona grandes dificultades para su determinación y hace que, en la actualidad, aun sea evidente la falta de datos físicos y/o correlaciones que proporcionen aproximaciones fiables y con validez para una amplia gama de combustibles. A continuación se comentan brevemente los principales aspectos de estas variables.

Temperatura

La temperatura de la llama en un incendio forestal presenta grandes fluctuaciones, sin alcanzar propiamente el estado estacionario (incluso en intervalos del orden de segundos). En la Figura 5.3.1 se ilustra este comportamiento y en la Tabla adjunta se presentan valores experimentales puntuales obtenidos en diferentes incendios. Tal como se concluye del capítulo 3, la llama presenta un perfil de temperaturas (tanto en la dirección horizontal como en la vertical) y, por tanto, dichos valores serán validos para pequeñas regiones en el mismo instante del registro.

En general, existe consenso por parte de los investigadores en lo referente a la dificultad encontrada para la medición exacta de la temperatura en un incendio forestal, atribuyéndola, principalmente, a los siguientes factores: las limitaciones del equipo e instrumentos de medida (termopares y termografía infrarroja), la influencia que sobre la temperatura ejercen los continuos cambios de las condiciones ambientales (humedad y viento) y las características del combustible.

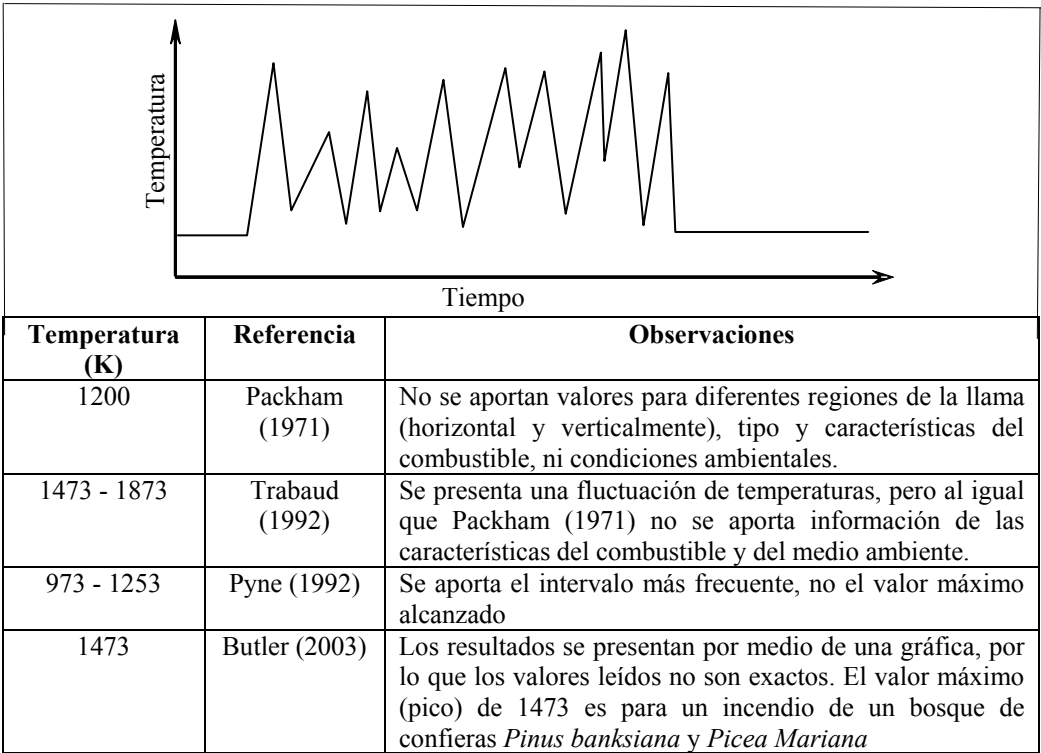


Figura 5.3.1. Temperatura de la llama de un incendio forestal.

Emisividad

Esta propiedad ha sido comentada ya en la sección 2.2.4. En este apartado tan sólo se consideran algunas observaciones que pueden representar dificultades o limitaciones para su utilización en la modelización de la transferencia del calor.

El principal problema se encuentra en que su correcta determinación es sumamente compleja, por una parte debido a sus características fluctuantes con respecto al tiempo y al espacio y, por otra parte, por su dependencia de factores de difícil predicción (temperatura y grosor de la llama y temperatura de los gases que se puedan emitir) (Planas *et al.*, 2003).

No obstante, es preciso indicar que la emisividad de las llamas no siempre alcanza el valor de 1; la suposición de este valor es una simplificación que frecuentemente se hace en la modelización de los incendios (Pastor *et al.*, 2002; Sullivan *et al.*, 2003). La principal condición que se debe cumplir para que ésta sea una suposición válida está basada en el grosor de la llama y, tal como se puede intuir en las imágenes termográficas del capítulo 3, a través de un eje vertical (altura y/o longitud de la llama), en general no se cumplirá. Cohen ha sugerido como grosor mínimo necesario 3 metros (Sullivan *et al.*, 2003).

Geometría

La determinación correcta de la geometría de la llama es extremadamente difícil de realizar (aun con los actuales avances tecnológicos). Lo anterior se explica por el ya mencionado comportamiento fluctuante de las llamas. Por otra parte, la simplificación más común de la geometría de una llama, consiste en considerarla como un cuerpo de forma paralelepípedica que representa el frente de llama, cuya superficie rectangular irradia de manera constante y uniforme hacia un objetivo (se asumen características constantes con respecto al tiempo y al espacio). Como se ilustra en la Figura 5.3.2, tales suposiciones no pueden ser satisfechas y, por tanto, los resultados obtenidos con estas consideraciones son siempre aproximaciones.

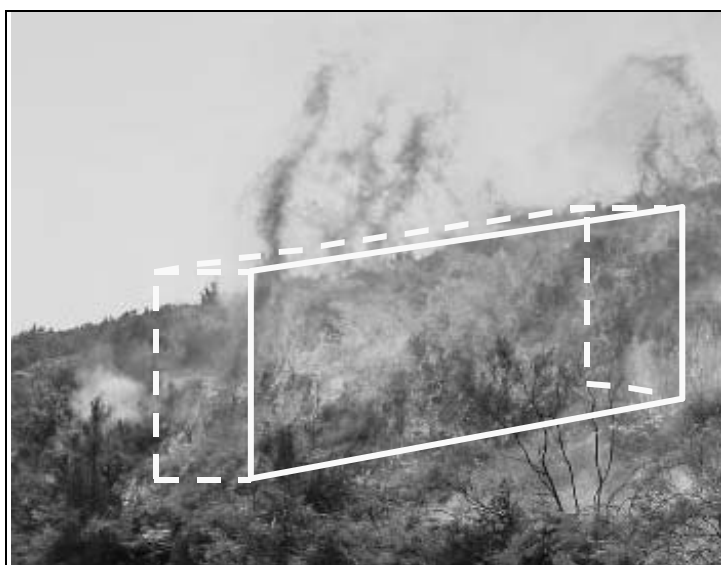


Figura 5.3.2. Representación frecuentemente supuesta de la llama de un incendio forestal en la que se considera uniformidad en la superficie del paralelepípedo.

Poder emisivo (E_p)

El valor del poder emisivo de la llama viene establecido por las ecuaciones 5.4 y 5.5. La temperatura y la emisividad de la llama son las propiedades que lo determinan. Como ya ha sido comentado, ambas propiedades presentan grandes fluctuaciones con respecto al tiempo y al espacio. Por tanto, la determinación del poder emisivo con la suposición de un solo valor (temperatura promedio y emisividad promedio) para toda la superficie de la llama, incluye un error que podrá ser menor si el valor considerado es representativo; es por esto que se sugiere: i) eliminar las temperaturas puntuales, ii) considerar la llama por zonas, dando importancia a la región más caliente y a la que se presente con mayor frecuencia (aunque como ya se ha dicho en el capítulo 3, la aplicación de las sugerencias anteriores tienen como principal limitación la falta de datos, es decir, el desconocimiento del perfil de temperaturas y emisividades a través de la superficie de la llama).

Como valor de referencia y empleando las temperaturas publicadas por diferentes investigadores, en la Tabla 5.2 se determina el poder emisivo considerando la llama como un cuerpo negro. Consecuentemente, obsérvese que éste sería el valor máximo posible en un incendio forestal.

Tabla 5.2. Poder emisivo de una llama ideal (considerada como un cuerpo negro).

Referencia	Temperatura (K)	Poder emisivo (W/m^2)	Observaciones
Packham (1971)	1200	118 000	Valores experimentales con llamas de hasta 10.6 m de altura
Trabaud (1992)	1473	270 000	Intervalo comúnmente registrado durante un incendio forestal.
	1873	700 000	
Pyne (1992)	973	50 000	Intervalo comúnmente registrado durante un incendio forestal.
	1253	140 000	
Butler (2003)	1473	267 000	Valores puntuales máximos en pruebas de campo.

5.4. Determinación del factor de vista

Por definición, el factor de vista considera la porción geométrica relativa de las superficies involucradas (emisor y receptor); por tanto, el primer paso importante consiste en definir la geometría del sistema, siendo evidente que estudiar todas las formas y sus combinaciones es imposible. Lo anterior conduce a la simplificación del problema mediante la generalización y la suposición de las situaciones que se puedan presentar con mayor frecuencia. Posteriormente, será necesario seleccionar el método y/o técnica para la resolución del problema para geometrías particulares.

La generalización de las configuraciones en el intercambio entre las superficies normalmente involucradas en un incendio forestal considera tres posibilidades: la configuración para el intercambio entre dos elementos infinitesimales, la configuración para el intercambio entre un elemento infinitesimal y una superficie finita y la configuración para el intercambio entre dos superficies finitas.

Elementos diferenciales

El factor de vista F_{ij} , entre un área diferencial dA_i de un elemento (emisor i) con respecto a un segundo elemento (receptor j) de área dA_j , está dado por la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_j \quad (5.16)$$

donde

- θ_i es el ángulo formado por la línea de conexión y la normal a la superficie dA_i
- θ_j es el ángulo formado por la línea de conexión y la normal a la superficie dA_j
- R es la longitud de la línea de conexión entre ambas superficies.

Los parámetros de la ecuación 5.16 se representan en un escenario de incendio forestal en la Figura 5.4.1, de forma genérica; como ya se ha mencionado, las posibilidades de aplicación son infinitas.

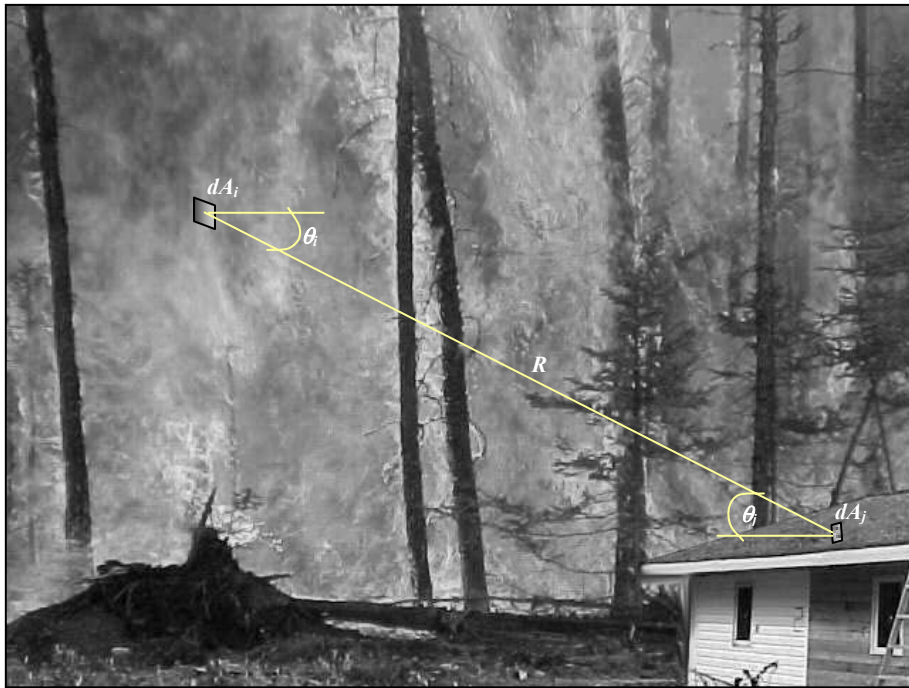


Figura 5.4.1. Configuración geométrica entre dos elementos infinitesimales

De área finita a elemento diferencial

Si el área emisora i es finita, entonces el factor de vista F_{ij} , desde el área finita A_i a la superficie diferencial dA_j , está definido por la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = \int_{A_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi R^2} dA_i \quad (5.17)$$

donde R representa la distancia entre el área finita y el elemento diferencial, y θ los ángulos respectivos entre las superficies y su normal.

Nótese que la aplicación de la ecuación 5.17 a casos prácticos requiere la definición de una geometría que se ajuste a la situación concreta a estudiar, considerando factores tales como el viento, pendiente, combustible, etc. Una práctica común en incendios de hidrocarburos suele ser la consideración de figuras tales como triángulos, cuadriláteros, conos, paralelepípedos, etc. En la Figura 5.4.2 se ha supuesto una figura cilíndrica inclinada por el efecto del viento y como elementos diferenciales dos casos; en el primero de ellos se considera al combustible colocado enfrente de la llama, y en el segundo caso, un punto de la persona colocada perpendicularmente a la dirección del viento.

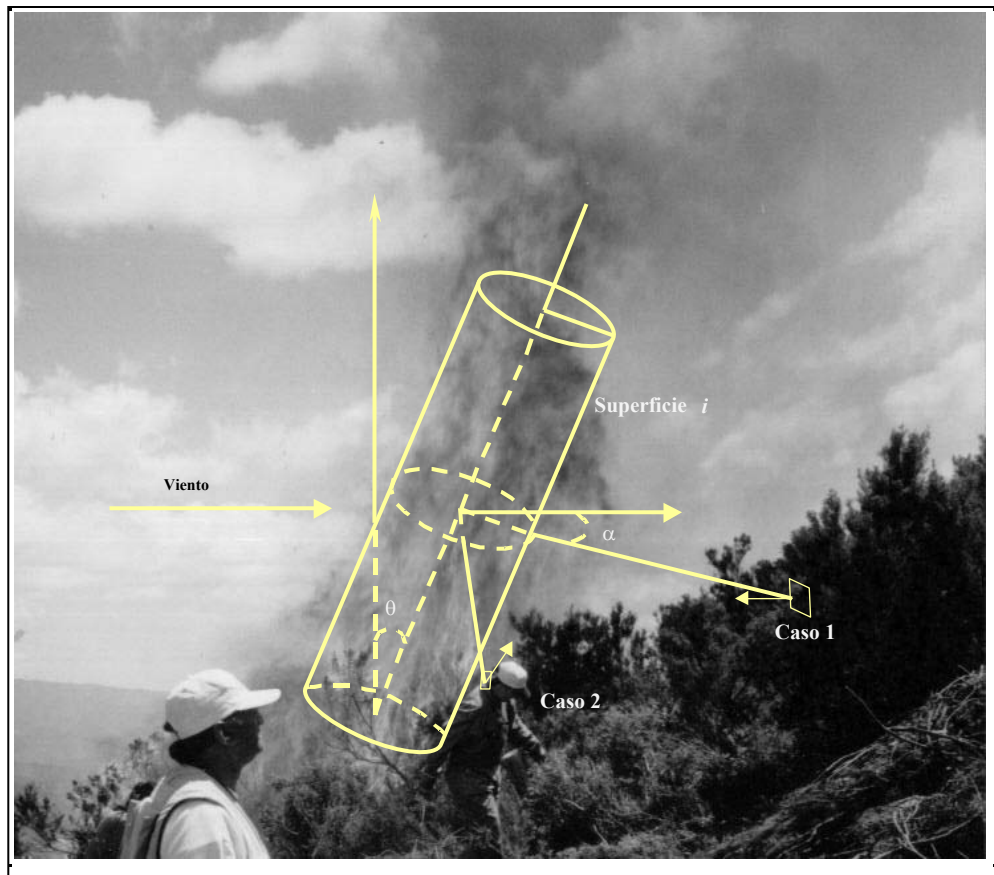


Figura 5.4.2. Sistema considerado para la obtención del factor de vista entre una geometría finita (cilindro inclinado) y un elemento infinitesimal (modificación del sistema presentado por Guelzim et al., 1993).

De área finita a área finita

Para el caso en que A_i y A_j son áreas finitas, el factor de vista está definido por la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (5.18)$$

5.4.1. Ecuaciones analíticas para la determinación del factor de vista

Con la finalidad de resolver casos prácticos y teniendo como objetivo el establecimiento de zonas de seguridad, se han seleccionado ecuaciones analíticas para la determinación del factor de vista para configuraciones que se puedan aplicar en situaciones similares a las representadas en la Figura 5.2.2. Cabe agregar que no ha sido objetivo de este trabajo el desarrollo matemático de dichas ecuaciones que, por otra parte, pueden encontrarse en la literatura especializada. Sin embargo, se han encontrado errores de manipulación (en ecuaciones con tantos términos son frecuentes errores de transcripción y, en la sustitución de valores, errores importantes por truncamiento y redondeo). Howell (2001) pone de manifiesto un número importante de trabajos donde se comenta este hecho.

A continuación se presentan las ecuaciones analíticas seleccionadas con la descripción de sus principales características.

5.4.1.1. Fuente emisora de área finita vertical y paralela a un elemento receptor (TNO, 1997)

Se asume una configuración geométrica como la representada en la Figura 5.4.3, donde el máximo factor de vista está determinado por la contribución de los componentes vertical y horizontal.

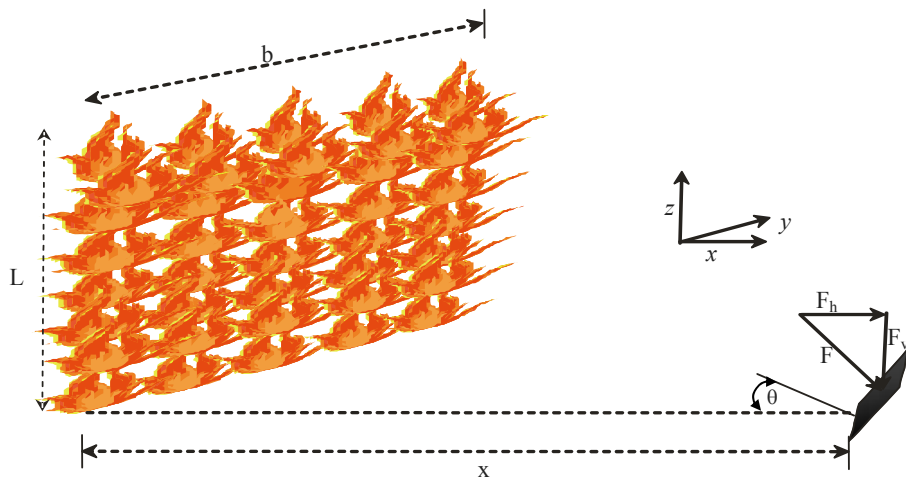


Figura 5.4.3. Disposición geométrica considerada para la determinación del factor de vista entre un emisor rectangular y un elemento diferencial al frente de una esquina.

Las ecuaciones que permiten la determinación analítica son:

$$F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (5.19)$$

donde

$$F_h = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\arctg\left(\frac{1}{x_r}\right) - A \cdot x_r \cdot \arctg A \right] \quad (5.20)$$

$$x_r = \frac{x}{b} \quad (5.21)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}} \quad (5.22)$$

$$F_v = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[h_r \cdot A \cdot \arctg A + \left(\frac{B}{h_r} \right) \cdot \arctg B \right] \quad (5.23)$$

$$h_r = \frac{L}{b} \quad (5.24)$$

$$B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r^2}} \quad (5.25)$$

- x corresponde a la distancia entre la fuente emisora y la receptora
b es la anchura de la fuente emisora (llama o frente)
L es la altura de la fuente emisora (llama o frente).

5.4.1.2. Fuente emisora de forma rectangular paralela a un elemento diferencial con posibilidades de inclinación con respecto a la normal (Hollands, 1995)

La configuración considerada por Hollands (1995) para la determinación del factor de vista se presenta en la Figura 5.4.4 y la expresión matemática correspondiente está dada por la ecuación (5.26).

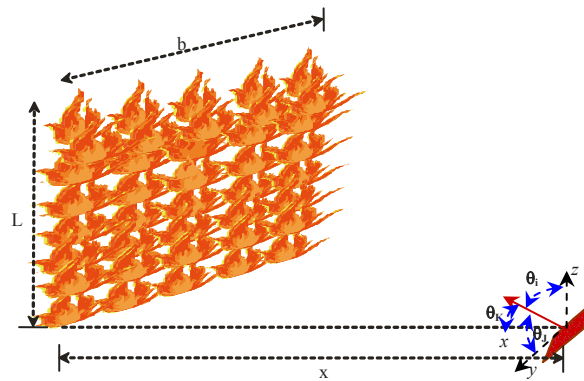


Figura 5.4.4. Configuración considerada por Hollands (1995) para un elemento emisor de forma rectangular con respecto a un elemento diferencial inclinado de forma arbitraria.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \tan^{-1} B \times \cos \theta_i + \tan^{-1} A \times \cos \theta_j + \frac{A \cos \theta_k - \cos \theta_i}{(1+A^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{B}{(1+A^2)^{1/2}} \\ & + \frac{B \cos \theta_k - \cos \theta_j}{(1+B^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{A}{(1+B^2)^{1/2}} \end{aligned} \right] \quad (5.26)$$

donde

$$A = L/x$$

$$B = b/x.$$

5.4.1.3. Fuente emisora de forma rectangular paralela a un elemento receptor (McGuire, 1953)

Esta configuración sitúa al elemento diferencial receptor paralelo al centro de la fuente emisora, supuesta ésta de forma rectangular y colocada verticalmente. La Figura 5.4.5 muestra esta disposición, mientras que la expresión para determinar el factor de vista es:

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{x_2^2 + y_1^2} \right) \\ & + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{x_1^2 + y_1^2} \right) \\ & + \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{z_2^2 + y_1^2} \right) \\ & + \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{z_1^2 + y_1^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

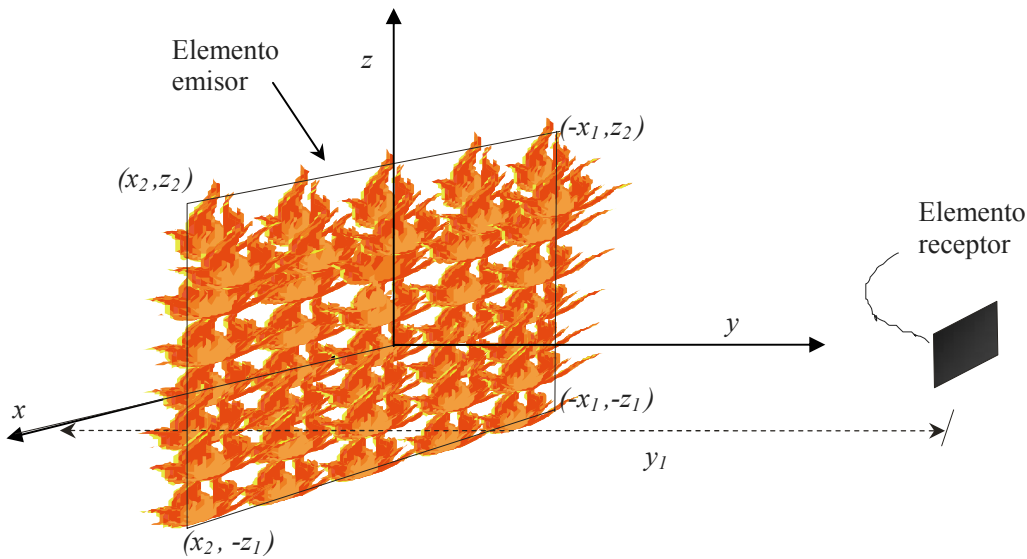


Figura 5.4.5. Frente de llama supuesto en forma rectangular paralela a un elemento diferencial

En la Figura 5.4.6 (a) se ilustra cómo el método propuesto por McGuire (1953) permite manipular las propiedades de adición y simetría del factor de vista, de manera que la suma de los factores de las áreas A, B, C y D, respectivamente, proporcionan el factor de vista total:

$$F_{Total} = F_A + F_B + F_C + F_D \quad (5.28)$$

Y en el caso de rectángulos con las mismas dimensiones:

$$F_{Total} = 4F_A \quad (5.29)$$

Una simplificación de la ecuación 5.27 permite la determinación del factor de vista para cualquiera de las áreas rectangulares. En la Figura 5.4.6 (b) se representa tal situación: una configuración donde el punto receptor se ubica en un punto paralelo a la esquina de la fuente emisora. La ecuación simplificada para esta situación es la siguiente:

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \right) + \left(\frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{x_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \right) \right\} \quad (5.30)$$

O bien, en función de las relaciones α y S :

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \sqrt{\frac{\alpha S}{1 + \alpha S}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\alpha/S}{1 + \alpha S}} + \sqrt{\frac{\alpha/S}{1 + \alpha/S}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\alpha S}{1 + \alpha/S}} \right\} \quad (5.31)$$

donde

$S = z_2 / x_2 =$ relación de altura - anchura de la fuente emisora,

$$\alpha = x_2 z_2 / y_1^2 = \frac{\text{área de la fuente emisora}}{(\text{separación entre emisor y receptor})^2}.$$

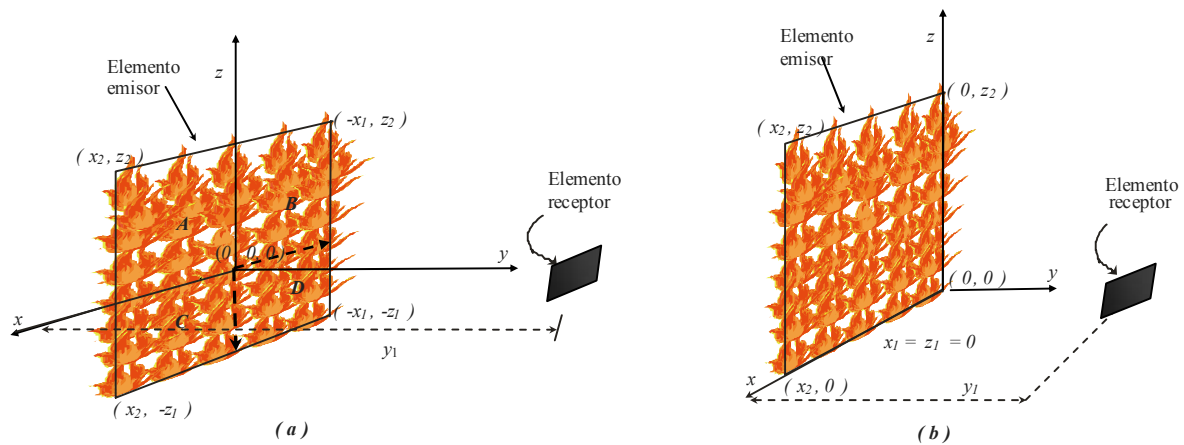


Figura 5.4.6. Configuración propuesta por McGuire (1953). (a) División del frente de llama en rectángulos simétricos. (b) Elemento receptor diferencial localizado al frente de una esquina de uno de los rectángulos

5.4.1.4. Fuente emisora de forma rectangular con un elemento diferencial receptor. Caso general (McGuire, 1953)

Esta configuración está considerada un caso general debido a que se toma en cuenta cualquier ubicación, inclinación o giro del elemento diferencial, cuantificando los ángulos con respecto a la normal tal como se indica en la Figura 5.4.7.

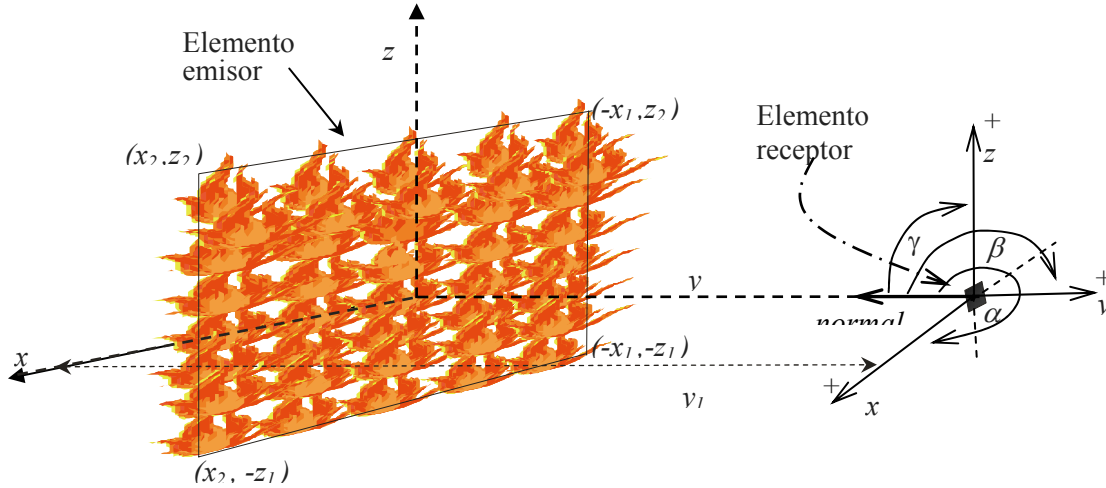


Figura 5.4.7. Elemento diferencial receptor con ángulos α , β y γ con respecto a la normal y a los ejes respectivos x , y , z en la dirección positiva.

La ecuación analítica propuesta por McGuire (1953) es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 F_{1-2} = & \frac{y_1 \cos \alpha}{2\pi \sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) \\
 & - \frac{y_1 \cos \alpha}{2\pi \sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \right) \\
 & - \frac{\cos \beta}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2}} \right) + \\ & \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) + \\ & \frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \right) + \\ & \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} \right) \end{aligned} \right\} \\
 & + \frac{y_1 \cos \gamma}{2\pi \sqrt{z_1^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{\sqrt{z_1^2 + y_1^2}} \right) \\
 & - \frac{y_1 \cos \gamma}{2\pi \sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \left(\tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} + \tan^{-1} \frac{x_1}{\sqrt{z_2^2 + y_1^2}} \right)
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

5.4.1.5. Fuente emisora de forma cilíndrica con elementos receptores diferenciales paralelos a la base del cilindro o a la sección transversal situada a la mitad de la altura del mismo (Kay, 1994)

El factor de vista para una configuración como la que se muestra en la Figura 5.4.8 (correspondiente, por ejemplo, a una columna de fuego o al incendio de un árbol aislado) se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi D} \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{D^2 - 1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[\frac{A - 2D}{D\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A(D-1)}{B(D+1)}} - \frac{1}{D} \tan^{-1} \sqrt{\frac{D-1}{D+1}} \right] \quad (5.33)$$

donde

$$D = \frac{y_1}{R}$$

$$L = \frac{z_2}{R}$$

$$A = (D + 1)^2 + L^2$$

$$B = (D - 1)^2 + L^2$$

Caso 1

La configuración geométrica se representa en la Figura 5.4.8. Consiste en una fuente emisora de forma cilíndrica con el elemento receptor diferencial paralelo a la base del cilindro. Para la determinación del factor de vista, se aplica directamente la ecuación 5.33.

Caso 2

La diferencia con respecto al caso anterior, se encuentra en que al elemento diferencial receptor se le ubica a una altura que corresponde a la mitad de la altura del cilindro (tal como se muestra en la Figura 5.4.8). Para esta configuración, Kay (1994) empleó la propiedad de simetría (efecto espejo). Considerando solo la mitad de la altura del cilindro ($z_2/2$), se obtiene el factor de vista mediante la ecuación 5.33 y el valor obtenido se duplica: $F = 2(F_{Z2/2})$.

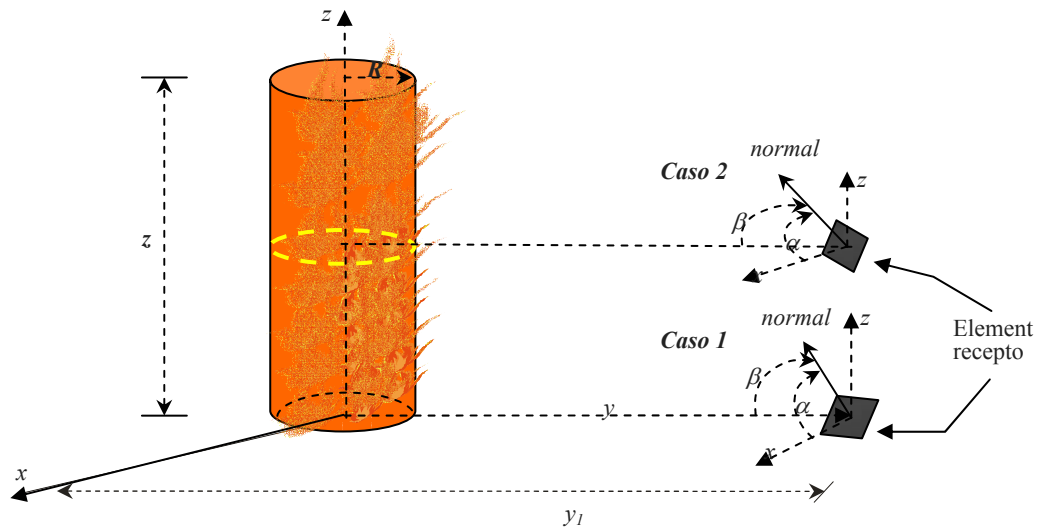


Figura 5.4.8. Frente de incendio supuesto de forma cilíndrica con elemento receptor diferencial

Si se considera alguna inclinación con respecto a la normal del elemento diferencial, es posible obtener el factor de vista mediante la relación de los ángulos, de la manera siguiente:

$$F_{1-2} = F \cos \phi \quad (5.34)$$

donde

$$\cos \phi = \cos \alpha \cos \beta$$

F es el factor de vista de la ecuación 5.33.

5.4.1.6. Fuente emisora de forma cilíndrica con elementos receptores diferenciales (TNO, 1997)

a) Se asume que la llama es vertical y que la superficie diferencial receptora se encuentra orientada de tal forma que el vector normal a esta superficie y el eje del cilindro se encuentran en un mismo plano (vertical), tal como se muestra en la Figura 5.4.9.

Las ecuaciones para la determinación del factor de vista son:

$$F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (5.35)$$

donde

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r + 1}{x_r - 1}} - \left(\frac{x_r^2 - 1 + h_r^2}{\sqrt{AB}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A}{(x_r + 1)B}} \right\} \quad (5.36)$$

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{x_r} \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{\sqrt{x_r^2 - 1}} \right) + \left(\frac{h_r(A - 2x_r)}{x_r \sqrt{AB}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A}{(x_r + 1)B}} \right. \\ \left. - \frac{h_r}{x_r} \tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r - 1}{x_r + 1}} \right\} \quad (5.37)$$

$$h_r = z / R \quad (5.38)$$

$$x_r = y_1 / R \quad (5.39)$$

$$A = (x_r + 1)^2 + h_r^2 \quad (5.40)$$

$$B = (x_r - 1)^2 + h_r^2 \quad (5.41)$$

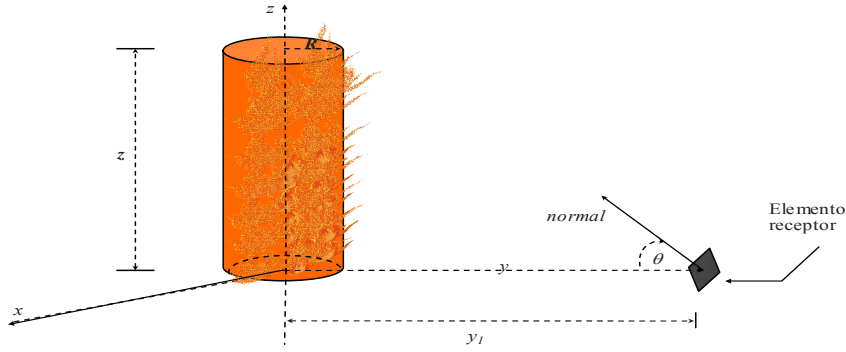


Figura 5.4.9. Llama cilíndrica con el elemento receptor diferencial localizado a la misma altura de la base del cilindro.

b) La aproximación de una llama inclinada es mediante una geometría cilíndrica e inclinada tal como se muestra en la Figura 5.4.10. El factor de vista puede determinarse mediante las siguientes expresiones:

$$\pi F_v = -E \tan^{-1} D + E \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1 + a \sin \theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta}{C} \right) \right] \quad (5.42)$$

$$\pi F_h = \tan^{-1} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta}{C} \right) \right] - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1 + ab \sin \theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \quad (5.43)$$

$$a = L/R \quad (L_b/R \quad \text{o} \quad L_f/R) \quad (5.44)$$

$$b = X/R \quad (5.45)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1) \sin \theta)} \quad (5.46)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1) \sin \theta)} \quad (5.47)$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1)(\cos \theta)^2)} \quad (5.48)$$

$$D = \sqrt{((b-1)/(b+1))} \quad (5.49)$$

$$E = (a \cos \theta)/(b - a \sin \theta) \quad (5.50)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} \quad (5.51)$$

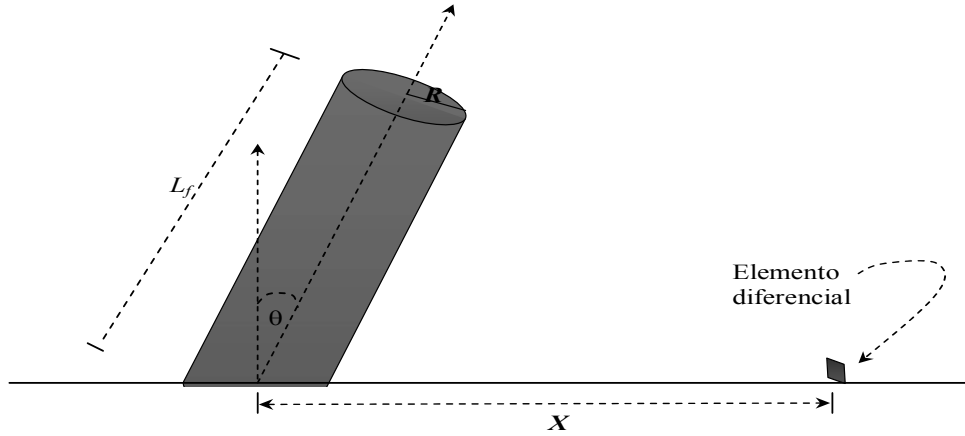


Figura 5.4.10. Aproximación cilíndrica de una llama inclinada.

Con pequeñas modificaciones, las ecuaciones 5.42 y 5.43 pueden ser usadas para estimar los factores de vista en situaciones como las que se muestran en la Figura 5.4.11. Los cambios que deberán considerarse en la distancia (dada en metros) entre la base de la llama y el punto considerado, así como para el factor de vista, son los siguientes:

Caso 1

$$F_v = F_v(L_2) - F_v(L_1) \quad (5.52)$$

$$F_h = F_h(L_2) - F_h(L_1) \quad (5.53)$$

donde

F_v , F_h del término de la derecha de la expresión, deberán determinarse mediante las ecuaciones 5.42 y 5.43.

$$L_1 = z / \cos \theta \quad (5.54)$$

$$L_2 = L_f + L_1 \quad (5.55)$$

y para la determinación de b (ecuación 5.45) deberá considerarse:

$$x_1 = X + z \tan \theta \quad (5.56)$$

Caso 2

Son válidas las ecuaciones (5.52) y (5.53), modificándose de la siguiente forma:

$$x_1 = X - z \tan \theta \quad (5.57)$$

$$L_1 = z / \cos \theta \quad (5.58)$$

$$L_2 = L_f - L_1 \quad (5.59)$$