



**Congreso Nacional del Medio Ambiente**  
Cumbre del Desarrollo Sostenible

**COMUNICACIÓN TÉCNICA**

# Algunas técnicas para el análisis y la prevención ante riesgos naturales de incendios, deslizamientos e inundaciones

Autor: Antonio Francos Araque

Institución: CGS INGENIERIA, SA

E-mail: [a.francos@cgsingenieria.com](mailto:a.francos@cgsingenieria.com)



## RESUMEN:

Los riesgos naturales relativos a incendios forestales, deslizamientos de ladera e inundaciones fluviales suponen en la práctica elevadas pérdidas de naturaleza socioeconómica y afectan prácticamente a la totalidad del territorio. Por ello, los diversos organismos públicos afrontan estudios técnicos para dar soporte a sus políticas de prevención y lucha contra los desastres naturales. La comunicación presenta una serie de técnicas desarrolladas y aplicadas recientemente para el análisis de la ocurrencia y la prevención ante dichos riesgos, de manera eficiente, a la escala de la ordenación del territorio. En el área forestal, se ha desarrollado un conjunto de modelos para evaluar tanto la susceptibilidad del territorio a la ocurrencia de incendios forestales como su evolución temporal ante escenarios climáticos concretos. Los modelos combinan las características naturales y de invasión antrópica existentes (como las infraestructuras lineales y ordenación del territorio). Finalmente, se presenta una metodología para la valoración de la eficiencia de las redes de vigilancia y una herramienta para la optimización de la posición de cada torreta de la red. En cuanto al estudio y prevención de los deslizamientos de ladera, se ha desarrollado una metodología de base estadística que a partir de los inventarios históricos de puntos de deslizamiento o mapas geomorfológicos digitales, permite cartografiar la susceptibilidad del territorio a los deslizamientos. El método ofrece una medida cuantitativa de la validez de la estimación y se han obtenido excelentes resultados en amplias zonas de gran complejidad estructural. Se concluye con la presentación de un modelo bidimensional de flujo de agua en cauces y llanuras de inundación. La entrada al modelo la constituyen la precipitación y los parámetros que determinan el tipo de suelo y su uso actual. Como salida, se obtiene el trazo de la zona inundable, los calados y las velocidades del flujo en cada instante de tiempo, señalando concretamente las zonas problemáticas para la seguridad de las personas y de sus bienes. El modelo permite operar sobre grandes cuencas hidrográficas sin requerir el volumen de datos que usualmente demandan los códigos comerciales complejos y obteniendo dichos datos de modo automático mediante GIS.



## RESUMEN

Los riesgos naturales relativos a incendios forestales suponen cada año elevadas pérdidas de naturaleza socioeconómica y afectan prácticamente a la totalidad del territorio. Por ello, los diversos organismos públicos afrontan estudios técnicos para dar soporte a sus políticas de prevención y lucha contra este tipo de desastre natural.

La comunicación presenta una serie de técnicas desarrolladas y aplicadas recientemente para el análisis de la ocurrencia y la prevención ante dichos riesgos, de manera eficiente, a la escala de la ordenación del territorio.

Por una parte, se ha desarrollado un conjunto de modelos para evaluar tanto la susceptibilidad del territorio a la ocurrencia de incendios forestales como su evolución temporal ante escenarios climáticos concretos.

Para evaluar la susceptibilidad del territorio ante incendios se parte de las coberturas geográficas existentes, tales como el modelo digital del terreno, tipos y uso del suelo, cobertura vegetal y concretamente mapa forestal, redes de infraestructuras lineales, núcleos de población o áreas recreativas. Las estadísticas e inventarios históricos se utilizan para el ajuste paramétrico final.

En cuanto a los modelos de propagación, combinan las características naturales y de invasión antrópica existentes (como las infraestructuras lineales y ordenación del territorio). Se aplican conceptos utilizados en diversos modelos ya existentes y validados, configurando una nueva y versátil herramienta de simulación matemática.

Por otra parte, un aspecto importante de la infraestructura de prevención y protección ante incendios lo constituyen las redes de puestos de vigilancia. Se presenta en este ámbito una metodología para la valoración multicriterial de la eficiencia de tales redes, basada en un nuevo procedimiento para la caracterización de las cuencas de visibilidad directa y oculta al puesto de vigilancia.

Para finalizar se describe una herramienta para la optimización de la posición de cada torreta de la red, basada en el análisis de grupos y las interacciones entre puestos vecinos, proponiendo un método que plantea los puntos que a priori verifican una serie de restricciones de partida (propiedad del suelo, accesibilidad, visibilidad), proporcionando así al técnico planificador un excelente soporte de cara a la toma de decisiones.



## **TÉCNICAS APLICABLES A LA GESTIÓN FORESTAL**

La gestión forestal supone cada año un gran volumen de inversión pública, tanto para la protección del medio natural, especialmente las zonas de especial relevancia, como en el ámbito de la protección de la población y las infraestructuras públicas.

Disponer de herramientas que faciliten la labor de los técnicos permite optimizar muchas de las actuaciones que cotidianamente se requieren. La elaboración de mapas de susceptibilidad y riesgo de incendios se ha completado por la mayor parte de las administraciones; tales mapas se convierten posteriormente en un documento de soporte habitual que son asimismo utilizados en ámbitos no directamente implicados en la gestión forestal, tales como las de fomento, gestión hidráulica, etc.

En algunos casos la elaboración de mapas se ha complementado con el diseño y desarrollo de aplicaciones informáticas específicas para el apoyo a determinadas tareas concretas, tales como los sistemas de información geográfica y geodatabases, modelos de simulación de determinados procesos físicos, recopilación y ordenación de información antecedente, etc.

Finalmente, otro de los esfuerzos que las administraciones desarrollan es la evaluación y optimización de sus infraestructuras de vigilancia. Existen en la actualidad recursos muy interesantes para apoyar en la toma de decisiones, aplicando metodologías matemáticas y estadísticas que, operando sobre las coberturas geográficas existentes, complementan de una manera cuantitativa la decisión experta de los técnicos.

La presente comunicación plantea algunas iniciativas en estos campos.

### **Evaluación de la susceptibilidad del territorio a la ocurrencia de incendios**

Pese a que el conocimiento de los factores naturales que nos rodean aumenta de forma exponencial con el avance de la técnica y especialmente con el desarrollo de los recursos tecnológicos, todavía no puede lograrse la respuesta exacta a ciertas cuestiones.

Basta observar las catástrofes naturales, ante las cuales, la necesidad de lograr una prevención efectiva exige precisar en alto grado el riesgo potencial de los eventos. Para ello se ha de tratar la información de modo que se obtengan previsiones de forma sistemática mediante modelos.

A nivel nacional, una de las catástrofes más preocupantes son los incendios forestales. Un incendio puede entenderse en el contexto de los riesgos naturales como un fuego que no es controlado por el hombre y cuyos efectos son negativos y no deseados. Dicho concepto, aplicado a un entorno natural define lo que se considera un incendio forestal.

Un esfuerzo considerable se está llevando a cabo por las diferentes administraciones e investigadores en diversos aspectos relacionados con los incendios. Algunos de ellos, como los relacionados a la cuantificación de su propagación o la evaluación de la susceptibilidad del territorio al acaecimiento de incendios forestales de cualquier naturaleza, admiten un tratamiento ingenieril que proporcione resultados de gran utilidad para la prevención y extinción de incendios.

#### El proceso físico y su representación matemática

El comportamiento de un incendio desde el punto de vista de su evolución temporal o propagación se basa en la intensidad de la reacción que se produce durante la combustión de una partícula de combustible. Dicha intensidad de reacción se puede



definir como la relación entre el calor recibido por el combustible con respecto al calor necesario para llevar dicho combustible a la temperatura de ignición.

La importancia de la modelización matemática de los incendios forestales radica en la predicción del comportamiento de dichos fenómenos y sus efectos en el entorno donde suceden, proporcionando una valiosa herramienta en los métodos de extinción.

Los intercambios energéticos durante un incendio son debidos principalmente a la radiación, de ahí que los modelos matemáticos para el cálculo de estos procesos se puedan clasificar en modelos diferenciales, integrales y semiempíricos.

Adicionalmente, los modelos heurísticos aportan resultados en términos de susceptibilidad a partir de relaciones sencillas (p.e. ecuaciones algebraicas) entre un conjunto de factores relevantes (p.e. pendientes o cubierta vegetal) donde los pesos se asignan arbitrariamente en función de datos históricos preexistentes (p.e. mediante regresiones o análisis multivariante) o de juicio de expertos.

1. Los modelos diferenciales describen el comportamiento de los procesos físicos y químicos principales a través de la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes. Para dicha resolución se utilizan los métodos de diferencias finitas, de elementos finitos y los de volúmenes finitos.
2. Los métodos integrales se desarrollan de forma semejante a los de diferencias finitas pero actúan sobre los teoremas de conservación de la masa, del momento y de la energía. La diferencia principal es la forma de las ecuaciones que es más simple y por tanto pueden ser integradas.
3. Los modelos semiempíricos son los más simples de los tres. Se basan en datos obtenidos de forma experimental. Sus resultados son fiables pero limitados a las condiciones específicas en que fueron efectuados los experimentos. Su ventaja esencial es que el balance entre su requerimiento de información, escala de trabajo, configuración del modelo de cálculo y requerimiento computacional les hace ser, en general, la única alternativa plausible.
4. Finalmente, los modelos heurísticos o categorizados, permiten mediante criterios cualitativos categorizar la susceptibilidad del territorio, en este caso a los incendios. Estos modelos son extremadamente sencillos y aplicables solamente a escala de la gestión del territorio, ya que no se basan en la física de los procesos sino en la coincidencia espacial de factores favorables o desfavorables.

#### Modelo heurístico de ignición y propagación

Se han desarrollado sendos modelos heurísticos para valorar la susceptibilidad del territorio a la ignición y propagación de incendios. Existen en la literatura algunas propuestas de combinación de las variables relevantes, que se han probado junto a otras nuevas y en su conjunto, se han analizado desde un punto de vista estocástico.

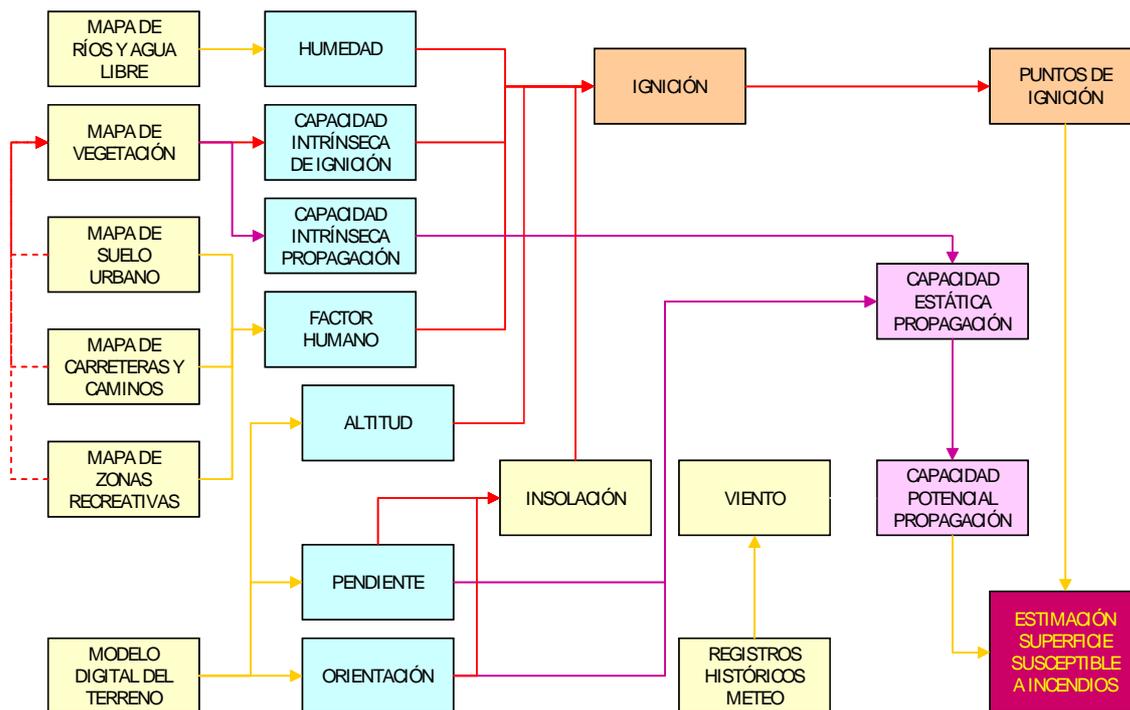


Ilustración 1. Esquema conceptual para los modelos heurísticos.

La susceptibilidad a la ignición incorpora en realidad los casos de incendio provocado o espontáneo; éstos últimos se originan por la presencia de elementos que pueden originar el incendio como consecuencia de la radiación solar, infraestructuras lineales de transporte de energía, etc. Por lo tanto todos los elementos que pueden actuar como desencadenantes y que están disponibles en forma de mapa se incorporan al modelo de susceptibilidad a la ignición.

En cuanto a la susceptibilidad a la propagación, normalmente difiere del correspondiente a la ignición en que el elemento desencadenante no es en muchas ocasiones elemento de conducción del fuego, que suele depender casi exclusivamente de la combustibilidad de los materiales presentes y de la topografía específica de la zona. Adicionalmente hay factores extrínsecos influyentes como el viento o la temperatura del aire.

#### Modelos físicos de propagación

En el estudio de los incendios forestales, existen diversas clasificaciones de los modelos en función de las características físicas de los incendios (Pastor *et al.*, 2003). Se distingue así entre modelos empíricos o estadísticos, físicos o deterministas y aquellos intermedios denominados semiempíricos o semifísicos.

La falta de fundamentos físicos exige cautela en el empleo de los modelos empíricos. Por otra parte, ninguno de los modelos actuales es única y exclusivamente “físico” (Catchpole y de Mestre, 1986; Dupuy, 1997). Se ha de añadir que las lagunas existentes en diversos aspectos de los procesos físicos y químicos (durante el intercambio energético del proceso) han ocasionado que la simulación de los incendios forestales mediante modelos físicos aún se encuentre en desarrollo (Catchpole, 1986; Weber, 1991; Morandini, 2001). En la Tabla 1 se pueden ver algunos de los principales modelos que se aplican en el estudio del comportamiento de los incendios.

Tabla 1. Algunos modelos de propagación de incendios.

Modelo Físico	Modelo Empírico	Modelo Semiempírico
Fons (1946)	McArthur (1966)	Frandsen (1971)
Emmons (1964)	Noble et al. (1980)	Rothermel (1972)
Van Wagner (1967)		Anderson et al. (1982)
Pagni y Peterson (1973)		Green (1983)
Konev y Sukhinin (1977)		
Albini (1985 - 1986)		
De Mestre et al. (1989)		
Weber (1989)		
Dupuy (1997, 1999, 2000)		
Morandini et al. (2000,2001)		

De entre los modelos indicados, por diferentes motivos que se detallarán posteriormente se ha seleccionado el modelo de Rothermel (1972), incorporando algunas modificaciones.

El modelo de Rothermel o sus derivados es uno de los más utilizados por la comunidad científica para la descripción del comportamiento de incendios y constituyen la base de los códigos de simulación más utilizados. Se trata de un modelo semiempírico que, partiendo del principio de conservación de la energía, estudia el intercambio de calor durante el avance del incendio, de manera que predice la velocidad de propagación en un lecho de combustible homogéneo según la expresión:

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

Donde:

$R$  es la velocidad o tasa de propagación del incendio.

$\phi_w$  se denomina factor de viento

$\phi_s$  se denomina factor de pendiente

$I_R$  es la intensidad de reacción [ $\text{kJ/m}^2 \text{ min}$ ] y se define como la energía liberada por metro cuadrado en el frente de llama durante el tiempo de residencia. Se define como  $I_R = \Gamma' \omega_n h \eta_m \eta_s$ , donde  $\Gamma'$  es la velocidad óptima de reacción,  $\omega_n$  la carga neta de combustible,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor,  $\eta_m$  el coeficiente de amortiguación de la humedad y  $\eta_s$  el coeficiente de amortiguación del suelo.



$\xi$  es la fracción de flujo de energía de propagación [adimensional], es decir la fracción de la energía de reacción que interviene el precalentamiento del combustible.

$\zeta$  es el número de calentamiento efectivo [adimensional]. Proporción de la cama de combustible que necesita ser calentada hasta la temperatura de ignición. Los valores oscilan entre 0 y 1 según la expresión  $\zeta = \exp(-4.528/\sigma^*)$ , donde  $\sigma^*$  - relación (superficie/volumen) de la partícula.

$Q_{ig}$  es el calor de preignición [kJ/kg], que para todos los modelos de combustibles toma un valor de 18608 kJ/kg.

Los factores de viento y pendiente dependen a su vez del grado de compactación del combustible, de la velocidad efectiva del viento a la mitad de la altura de la llama corregida según su ángulo con la pendiente y parámetros dependientes de la forma y tamaño de las partículas combustibles. Otros parámetros básicos del modelo son:

$U_{eff0}$  - velocidad efectiva del viento a una altura de mitad de llama [m/s].

$U_{eff}$  - velocidad efectiva corregida a la pendiente [m/s], según

$$U_{eff} = (0.3066 U_{20+H}) / (f \cdot 3.28 H)^{1/2} \ln((20+1.18 H) / (0.43H))$$

Donde:

H - altura media a la que se encuentran las copas [m].

$U_{20+H}$  - velocidad del viento a 20 pies (6.1 m) sobre las copas [m/s].

f - factor de relleno de copas [adimensional].

$$f = (F_{cc} / 100) \pi/12$$

$F_{cc}$  - fracción cabida de la cubierta, (sup. Cubierta x 100)/ sup. parcela [%]

$\rho$  - densidad [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_b$  - densidad aparente [kg/m<sup>3</sup>], calculado como  $\rho_b = w_0 / \delta$ , donde  $w_0$  es la carga neta de combustible seco [kg/m<sup>2</sup>] y  $\delta$  el grosor del lecho de combustible [m]

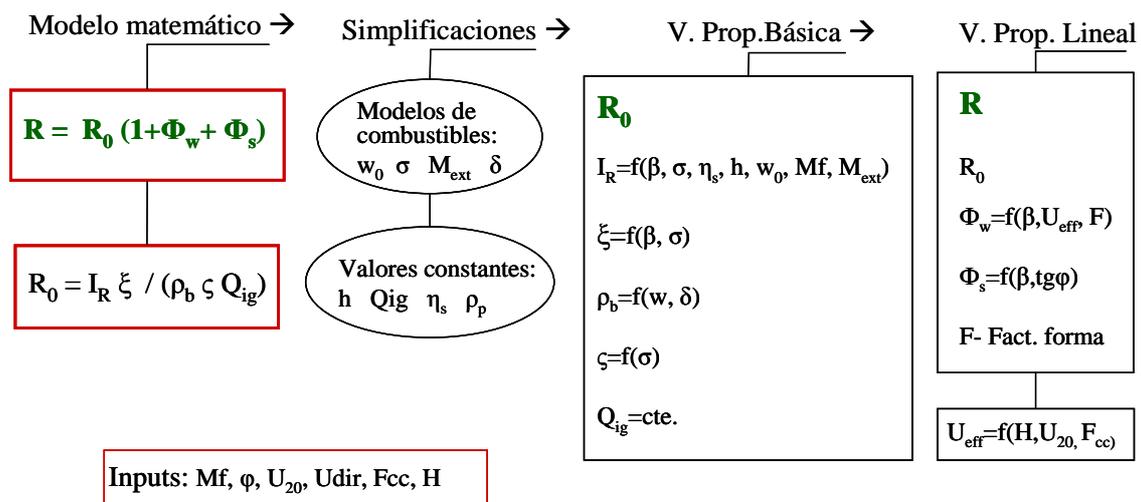
Por tanto, la formulación básica de Rothermel presupone que un incendio se propagará aún en ausencia de viento y en un terreno sin pendiente. Su ecuación queda determinada mediante el empleo de parámetros obtenidos a partir de datos experimentales lo que implica una simplificación del problema pero reduciendo el rango de condiciones en que el modelo es aplicable. En general se requieren estudios particulares en función de la ubicación del lugar de trabajo. La base experimental del modelo exige un amplio estudio de las condiciones que afectan a la evolución de un incendio.

En principio, las condiciones climatológicas se suponen constantes en la formulación original del modelo pero se ha desarrollado un procedimiento para la simulación en modo no permanente.

Los efectos del viento, la humedad del combustible, la altura de cobertura vegetal desprovista de humedad y la pendiente en el frente de llama deben ser estudiados y analizados para actualizarlos a cada situación a la hora de aplicar el modelo, es decir, para determinar las características de comportamiento de cada material como combustible y en definitiva, se trata para cada región de dar valores al conjunto de parámetros que aparecen en las ecuaciones.

### Adaptación a la evaluación de la susceptibilidad estacionaria

El modelo de combustibles establece la conductividad del territorio a la transmisión del fuego. Existen muchos modelos que representan la transmisión de una determinada variable física pero pocos pueden ser adaptados al caso de incendios forestales sin asumir un gran número de hipótesis simplificadoras. En el presente caso se ha optado por calcular la velocidad intrínseca de propagación  $R_0$ . Entonces, se asume que la susceptibilidad del territorio desde un punto de vista estático o intrínseco está dado por dicha variable, tal y como indica la ilustración adjunta.



*Ilustración 2. Modelo estacionario de susceptibilidad del territorio a incendios.*

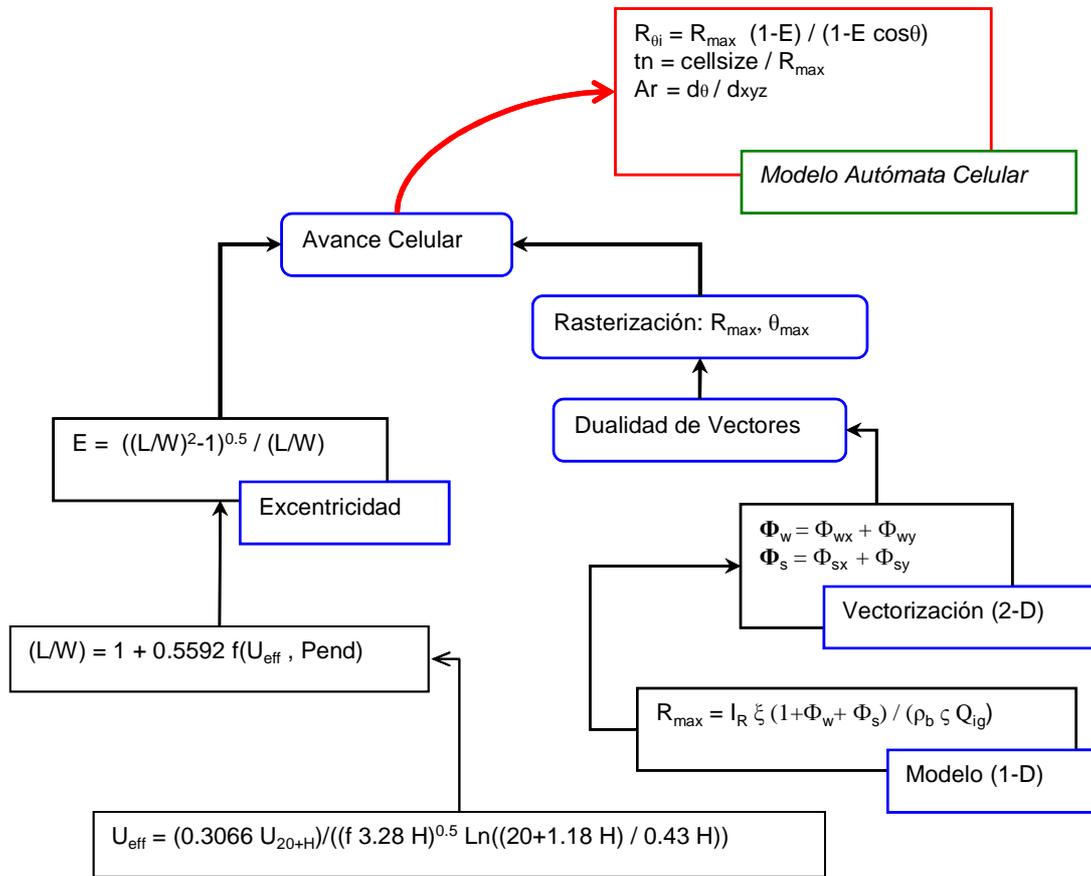
### Adaptación a un modelo de cálculo transitorio

Para poder aplicar el modelo al seguimiento de eventos de incendio en función del tiempo se han llevado a cabo las modificaciones que se describen a continuación. Con ellas, el modelo puede aplicarse para elaborar mapas de riesgo realizando simulaciones repetitivas, bien estructuradas o bien en el seno de metodologías probabilistas.

La aplicación tipo en casos concretos estaría de acuerdo al que se muestra en la Ilustración 4, donde existe una zona recreativa y una zona residencial, la primera como punto de ignición probable y la segunda como elemento vulnerable. Se trata en este caso de evaluar la densidad de distribución de los tiempos de llegada y utilizar este resultado en el diseño de los planes de emergencia o el dimensionamiento de la infraestructura de protección ante incendios.

Las hipótesis de partida asumen, para una cierta área, que el combustible es homogéneo, que el incendio está conducido a través de materia vegetal inerte y en las proximidades del suelo. Es decir, que el avance del incendio está determinado por el fuego de superficie y no por el fuego de copas.

Para poder aplicar estas hipótesis es necesario, por lo tanto, discretizar el territorio según áreas homogéneas, asignando modelos de combustible a cada una de ellas y en consecuencia aplicando sus correspondientes parámetros.



$R_{\theta_i}$  = Velocidad de propagación en la dirección  $\theta_i$   
 $R_{max}$  = Velocidad de propagación máxima:  
 (Rothermel)  
 $(L/W)$  = Excentricidad de la elipse de propagación.  
 $U_{20+H}$  = Velocidad efectiva del viento a 6.1 m sobre copas  
 $U_{eff}$  = Velocidad efectiva corregida a la pendiente del terreno  
 $d_{\theta}, d_{xyz}$  = distancia entre celdas y avance  
 $Ar$  = Avance relativo  
 $\Phi_w, \Phi_s$  = vectores viento y pendiente

Ilustración 3. Algoritmo del modelo de propagación de incendios.

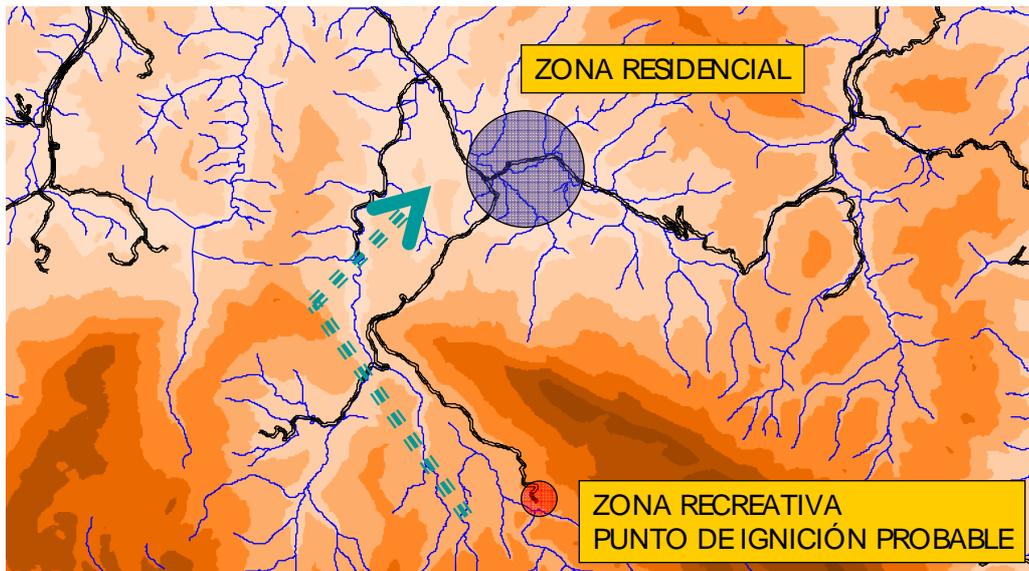


Ilustración 4. Aplicación tipo del código transitorio.

La implantación del modelo en modo transitorio se ha basado en un esquema de autómata celular. A partir de uno o varios puntos de ignición el fuego se va transmitiendo a las celdas vecinas en función de los respectivos modelos de combustible, pendiente y viento. La tasa de transferencia térmica determina el avance del frente del incendio en el tiempo y según avanza éste, se van actualizando los valores de velocidad y dirección del viento de acuerdo al escenario climatológico predefinido.

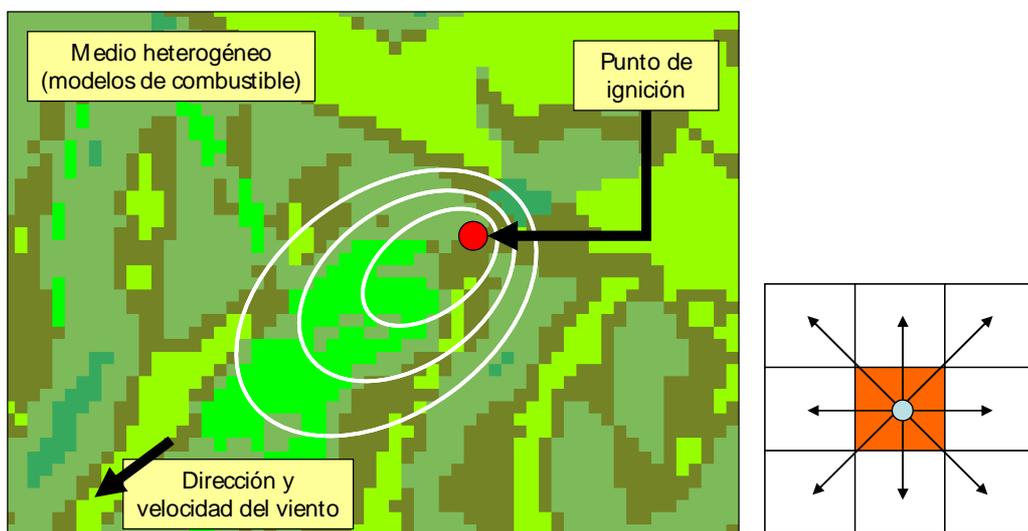


Ilustración 5. Planteamiento celular para la resolución de las ecuaciones de propagación.

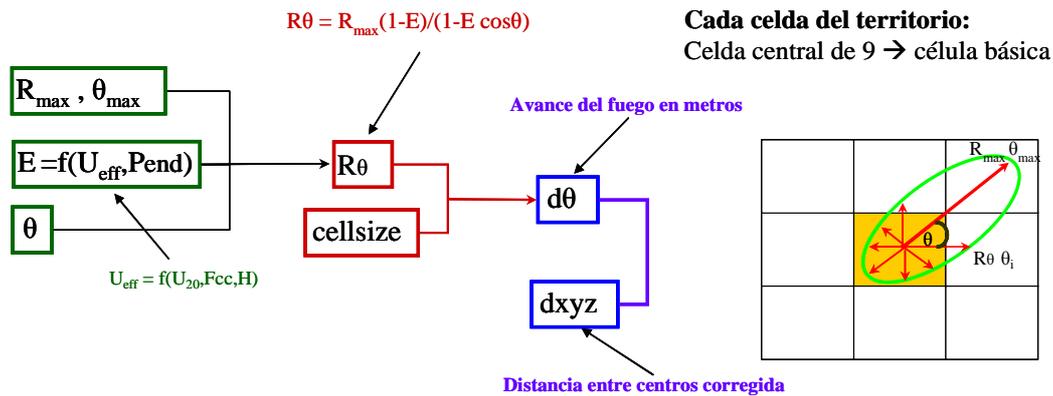


Ilustración 6. Esquema básico de cálculo.

El modelo reproduce la evolución del incendio en el tiempo y también evalúa su extinción por agotamiento del combustible, de tal manera que se visualiza en cada instante las zonas activas y las zonas quemadas y extintas en el dominio de cálculo.

Asimismo, se visualizan los tiempos de llegada del frente de incendio o isocronas de avance. Estas isocronas, combinadas con una muestra representativa de puntos de ignición probable (p.e. en el entorno de carreteras, senderos o especialmente zonas recreativas) permite el trazado de mapas de riesgo en una cierta región o localidad.

Teniendo en cuenta que cada punto de ignición conlleva una cierta probabilidad, en general inferida por el juicio experto del técnico, puede establecerse el riesgo sobre dichos valores de probabilidad combinados con la peligrosidad del evento.

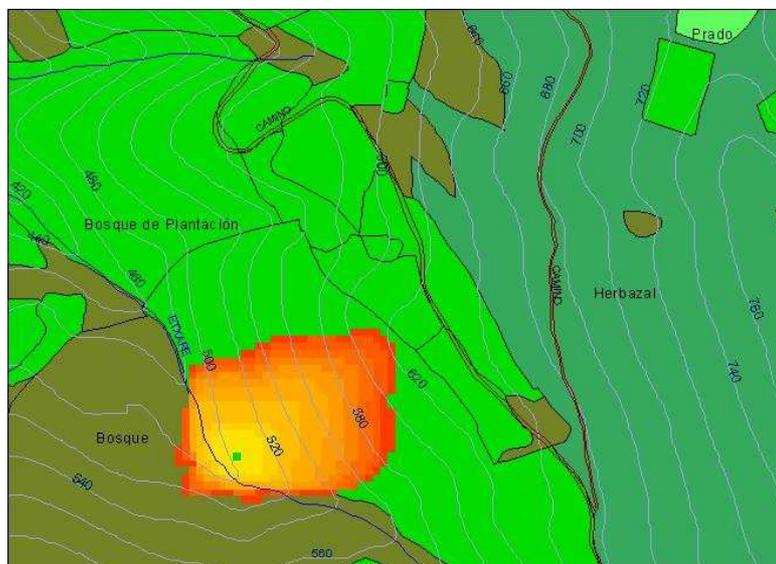


Ilustración 7. Tiempos de avance y grado de extinción de las zonas quemadas.

### Análisis de sensibilidad

Finalmente, cabe señalar la conveniencia de analizar los resultados de un estudio en términos de la valoración de su incertidumbre y de la sensibilidad del modelo a sus parámetros.

Tanto en la adjudicación de valores a los parámetros como en el establecimiento de hipótesis (simplificación de parámetros, probabilidades asociadas, etc.) se está asumiendo que se producen desviaciones con respecto a la compleja realidad física. Las propias ecuaciones no describen con exactitud dichos procesos y en definitiva, las soluciones que pueden obtenerse con la misma metodología, al resolver el mismo problema, por parte de equipos técnicos diferentes, serían asimismo distintas.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad pondrá de manifiesto cuales son los parámetros decisivos, en los que se debe afrontar un mayor esfuerzo en determinar sus valores con precisión.

Para ello, se asignan en primer lugar funciones de densidad de distribución a los parámetros que, de este modo, no tienen un valor fijo sino un rango de variación con una determinada ley. Posteriormente estas funciones se muestrean para obtener un conjunto de parámetros que conducen a la obtención de una solución del problema.

El paso siguiente consiste en obtener un grupo de N conjuntos de parámetros y en consecuencia, al aplicar el modelo se dispondrá de un conjunto de N realizaciones o soluciones diferentes. Estas N soluciones se distribuyen también estadísticamente según una distribución que puede analizarse estadísticamente.

Una posibilidad para la realización del análisis de incertidumbre consistirá simplemente en el análisis de la variabilidad sobre dicha función de distribución de los resultados.

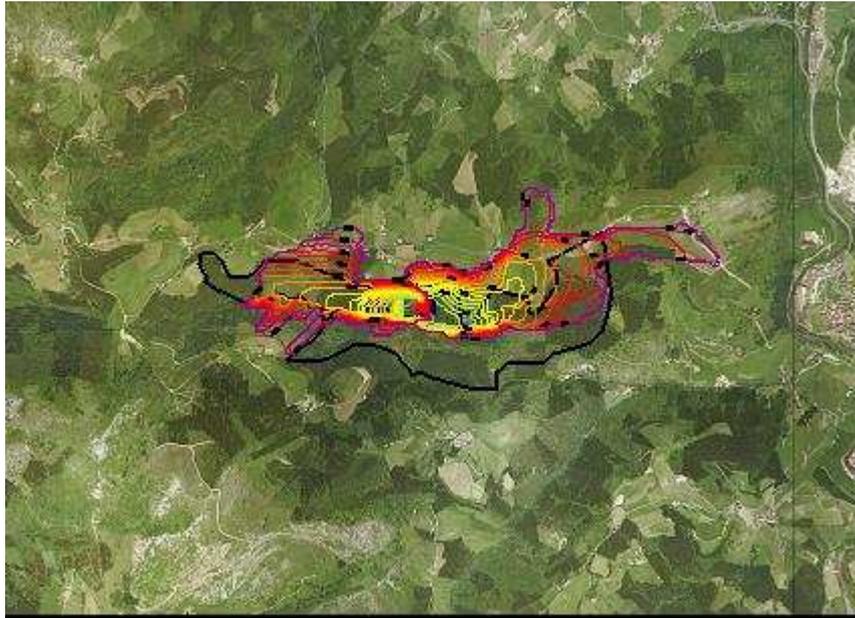
En cuanto al análisis de sensibilidad, pueden utilizarse múltiples técnicas. En el presente caso se plantea la aplicación del método FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test), ideado por Cukier et al (1973) y aplicado tal y como se describe en Saltelli et al (1997).

## Resultados

Como ejercicio de prueba se aplicó el modelo a un caso real acaecido durante la etapa de desarrollo del modelo. Aunque los datos disponibles no eran en algunos casos de gran calidad (datos de viento especialmente, dado que se disponía de un valor único y se constató que en realidad eran vientos racheados de dirección variable), otros datos esenciales sí eran muy precisos, tales como el punto de ignición (por rotura de una línea eléctrica), el momento en que se produjo y la delimitación del incendio cuando pudo finalmente extinguirse, que pudo por tanto asimilarse a la isocrona correspondiente.

La aplicación directa del modelo condujo a una solución errónea. Actuando sobre los parámetros de los modelos de combustible y sobre los valores de velocidad y dirección del viento, en torno al valor medido por la estación meteorológica más cercana, se obtuvo finalmente una solución mucho más parecida a la real, ajustándose igualmente las isocronas a las estimadas en el incendio real.

La conclusión inmediata del trabajo fue que disponiendo de un conjunto representativo de incendios reales podría finalmente disponerse de una descripción fidedigna de los modelos de combustible y que éstos constituyen el parámetro básico de actuación para calibrar la herramienta de cara a su aplicación en la práctica cotidiana.



*Ilustración 8. Calibración del modelo con un incendio real.*

### **Optimización de la eficiencia de las redes de vigilancia ante incendios**

Además del desarrollo de herramientas para la evaluación del riesgo, soporte a la elaboración de planes de emergencia y previsión de métodos de lucha contra los incendios, las redes de vigilancia constituyen el medio clave en la corrección de este tipo de desastre natural.

Se ha afrontado la tarea de desarrollar una metodología de evaluación de la eficiencia de una red de puestos de vigilancia, con los siguientes objetivos concretos:

1. Valorar la calidad de la visibilidad de un puesto para un radio visible dado, así como de las alturas de columna de humo que convierten una zona oculta en visible. Se trata por tanto de un aspecto basado en la topografía.
2. Combinar en el análisis los mapas de susceptibilidad, vulnerabilidad o riesgo ante incendios, así como las características específicas del territorio, tales como áreas de especial valor o dotadas de figuras de protección, para tener en cuenta si la zona visible se dispone o no sobre dichas zonas.
3. Diseñar un método de valoración multiobjetivo que a partir del numeroso conjunto de parámetros actuantes proponga valores simples de calificación y asimismo clasifique consecutivamente los puestos sobre la base de dichos valores.
4. Desarrollar un método de optimización de la ubicación de los puestos, que a partir de un grupo de puestos cercanos identifique el puesto pésimo y proponga ubicaciones alternativas que mejoren el rendimiento conjunto del grupo inicial.
5. Considerar en la toma de decisiones anterior parámetros básicos de reubicación, tales como la accesibilidad de dichos lugares o que se ubiquen en montes de propiedad pública.

### Análisis de visibilidad y columna de humo.

El parámetro aparentemente básico asociado a la eficiencia de un puesto de vigilancia visual es concretamente la fracción del territorio con visibilidad directa desde el puesto. Es cierto que posteriormente hay una variedad de factores influyentes, tales como el valor del territorio a proteger, el tipo de uso del suelo o cobertura vegetal, la ubicación de otros puestos de vigilancia, el acceso, la propiedad del terreno e incluso las condiciones topográficas de las zonas de sombra.

En el presente apartado se analiza en concreto el procedimiento seguido para determinar el área visible y también las alturas de columna de humo que convierten una zona oculta en visible.

Hay que incidir en que el proceso se ha diseñado y desarrollado íntegramente, utilizando una metodología propia, ante los errores asociados a paquetes informáticos comerciales de análisis, cuyos resultados han resultado ser decepcionantes.

Teniendo en cuenta la extensión del territorio y la resolución exigida para los resultados, se ha observado una extraordinaria complejidad desde el punto de vista computacional. Este hecho, unido a la falta de precisión y la lentitud de los algoritmos usuales de determinación de la visibilidad de que se dispone en algunos conocidos sistemas de información geográfica, hacía necesario diseñar un nuevo método que, con algunas condiciones o hipótesis de partida asumibles, permitiera el desarrollo de los cálculos con una eficiencia razonable.

En el ámbito de la simulación matemática se enfrentan con cierta frecuencia problemas que comparten esta situación. La física aporta a menudo ecuaciones diferenciales, por ejemplo, que describen con un elevado nivel de precisión un cierto proceso natural. La resolución de dichas ecuaciones desde un punto de vista riguroso en general no puede considerarse, debiendo recurrir a una simplificación del problema.

Este proceso es el mismo que se ha seguido en el presente caso. Considerando que un puesto de vigilancia, con un radio de visibilidad de 20 km cubre unos 1260 km<sup>2</sup> y que se tiene una resolución objetivo según celdas de 10x10 m, cada puesto de vigilancia supone aproximadamente 12.6 millones de celdas.

Teniendo en cuenta que gran parte de los cálculos consideran la interacción entre puestos vecinos, la cifra anterior se multiplica indefinidamente.

Cuando se plantea la realización de un mapa de visibilidad para finalmente elaborar un ratio de superficie visible frente a superficie total, los cambios de resolución no suponen un cambio relevante de los estadísticos principales de primer y segundo orden (media, varianza, etc.) De hecho son esos valores posteriormente los que se utilizan al evaluar la eficiencia del puesto.

La reproducibilidad de los resultados queda asegurada con el método que sigue y con tiempos de cálculo razonables. Posteriormente el algoritmo permite la elaboración de hipótesis y su adopción o descarte en base a las realizaciones disponibles.

Por otra parte, si se plantea el trazado de un mapa a una cierta escala el tamaño de píxel sí que adquiere importancia y no puede aumentarse a cualquier valor o no podría superponerse dicho mapa sobre otra cartografía u ortofoto preexistentes.

Analizando el rendimiento de los cálculos sobre una resolución de 100x100m, es decir un total de 0.126 millones de celdas para caracterizar cada puesto, se ha observado que los mapas son del todo análogos a los construidos con la resolución mayor y que en condiciones normales de impresión en papel la calidad apenas se resiente. Los cálculos

realizados para dicha resolución aportan el mismo resultado, puede trabajarse con tiempos de computación aceptables y permite afrontar cálculos múltiples sobre la red (por ejemplo para el análisis de ubicaciones óptimas).

La metodología de análisis de visibilidad consiste en la ejecución sucesiva de los siguientes pasos:

1. Dado el punto donde se ubica el puesto y un cierto radio de visibilidad (en este caso 20 km), generar una malla de puntos alineados según un cierto espaciado  $E$  a lo largo de una serie de radios, separados a su vez un cierto ángulo  $\alpha$  (Ilustración 10 (a)).
2. Con esa masa de puntos, calcular en cada uno de ellos si es visible o no respecto al punto donde se ubica la torre y en este último caso, evaluar la columna de humo correspondiente que lo hace visible (Ilustración 9). Se aplica la expresión  $h = C(\tan \alpha - \tan \beta)$  según el gráfico que se muestra.
3. Terminado el paso anterior se dispone de un conjunto irregular de puntos con información de visibilidad y columna de humo y se genera mediante un procedimiento de interpolación de una malla regular de puntos de visibilidad y columna de humo (Ilustración 10).
4. Se establece unos rangos para preclasificar el territorio; en el presente caso se da como visible aquel punto cuya columna de humo tiene una altura inferior a 10m y posteriormente se establecen tres categorías de zona oculta.
5. Con los diversos mapas individuales generados en el paso anterior se constituyen los mapas de detalle de las cuencas visuales y columnas de humo (Ilustración 11).
6. La superposición sucesiva de los mapas individuales conduce a componer el mapa general de cuencas visuales y columnas de humo correspondientes a la región completa de la demarcación geográfica (Ilustración 12).

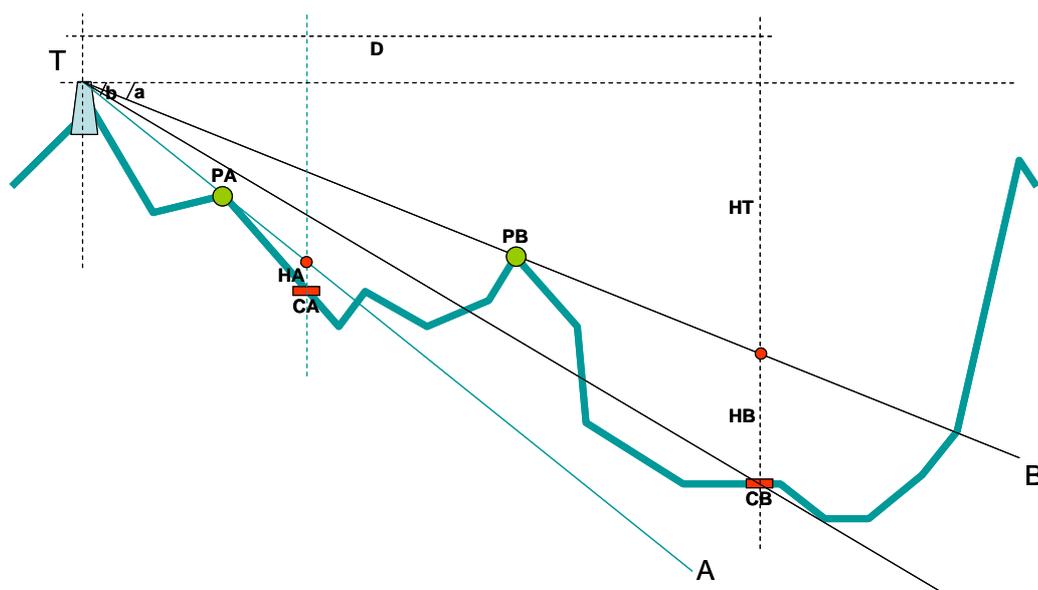
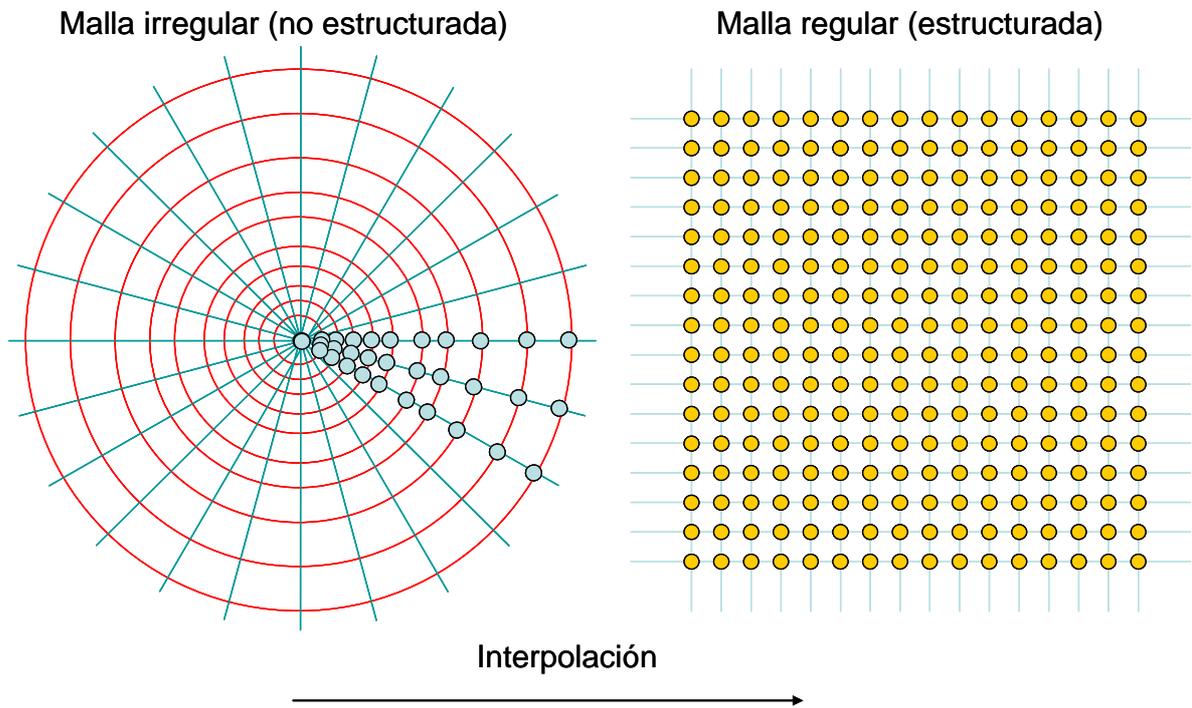
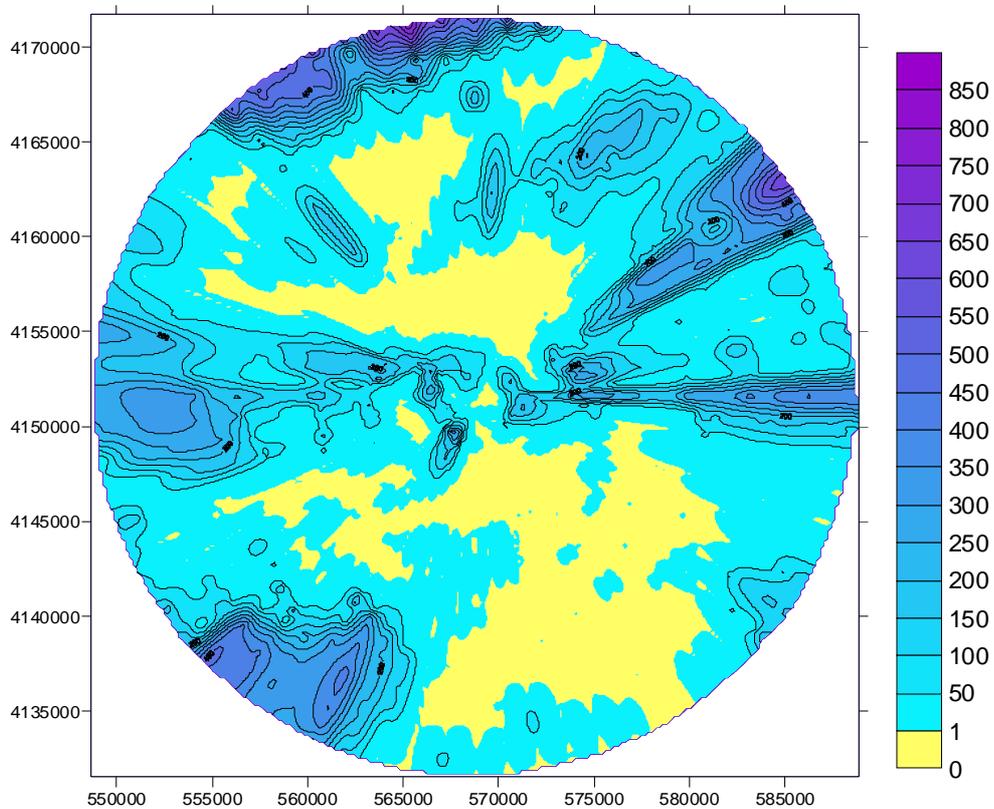


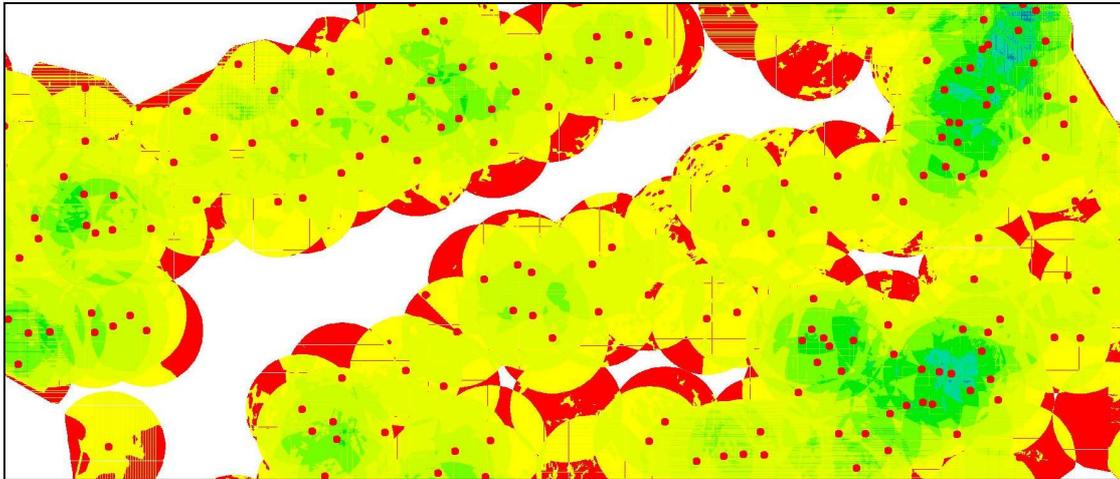
Ilustración 9. Determinación de la visibilidad u ocultación de un punto según un perfil.



*Ilustración 10. Paso de mallas no estructuradas a mallas estructuradas.*



*Ilustración 11. Mapa de detalle de cuencas visuales en un puesto de vigilancia.*



*Ilustración 12. Mapa regional de cuencas visuales del territorio completo.*

#### Método de valoración multiobjetivo

Para poder otorgar una calificación a un determinado puesto de vigilancia, así como la posterior comparación entre puestos, o la potencial bondad de una reubicación de uno de ellos con respecto a su situación actual, es necesario diseñar un método que, partiendo de la información disponible, permita sintetizarla en un único valor.

En primer lugar se han identificado los ámbitos principales de análisis. En cada uno de ellos se han observado los datos existentes, y se han definido una serie de parámetros representativos. En ocasiones se trata directamente de la transposición punto a punto de valores procedentes de mapas. Otras veces se han combinado estos para generar nuevos parámetros con sentido físico cierto y medible.

Posteriormente se definen diversos indicadores intermedios basados en la combinación de los parámetros anteriores. Los indicadores intermedios permiten la comparación entre puestos atendiendo a una característica específica, independientemente del peso de la misma sobre el total de la valoración. Estos indicadores intermedios se combinan a su vez en tres indicadores principales, correspondientes al ámbito topográfico, a la infraestructura o distribución de puestos y a la protección de la vulnerabilidad y el riesgo del territorio.

Los indicadores, intermedios o principales, aportan información relativa a los siguientes ámbitos:

1. Topográfico; estos indicadores se basan en los parámetros de visibilidad, de exclusividad de la zona visible, de visibilidad inversa (en qué medida se ve la zona protegida por un puesto de vigilancia desde los puestos vecinos) y en las características de las zonas de sombra.
2. Infraestructural; estos indicadores tienen en cuenta los solapes entre puestos de vigilancia ubicados de tal manera que sus zonas protegidas sean secantes an algún sector (en el presente estudio se ha considerado un radio visible de 20 km).



También considera el número de torres que solapan y el solape inverso (zonas visibles para otras torres que están ocultas para la torre en estudio).

3. De vulnerabilidad; este indicador se basa en medir la magnitud de la vulnerabilidad dentro de la zona vigilada (visible o no) de un cierto puesto y determinar que porciones de dicha vulnerabilidad se protegen o no mediante visión directa y qué porciones se protegen o no de manera exclusiva en dicho puesto.
4. De riesgo; este indicador se basa en medir la magnitud del riesgo dentro de la zona vigilada (visible o no) de un cierto puesto y determinar que porciones de dicha vulnerabilidad se protegen o no mediante visión directa y qué porciones se protegen o no de manera exclusiva en dicho puesto.

El diagrama adjunto describe y relaciona los diversos parámetros, indicadores intermedios e indicadores globales.

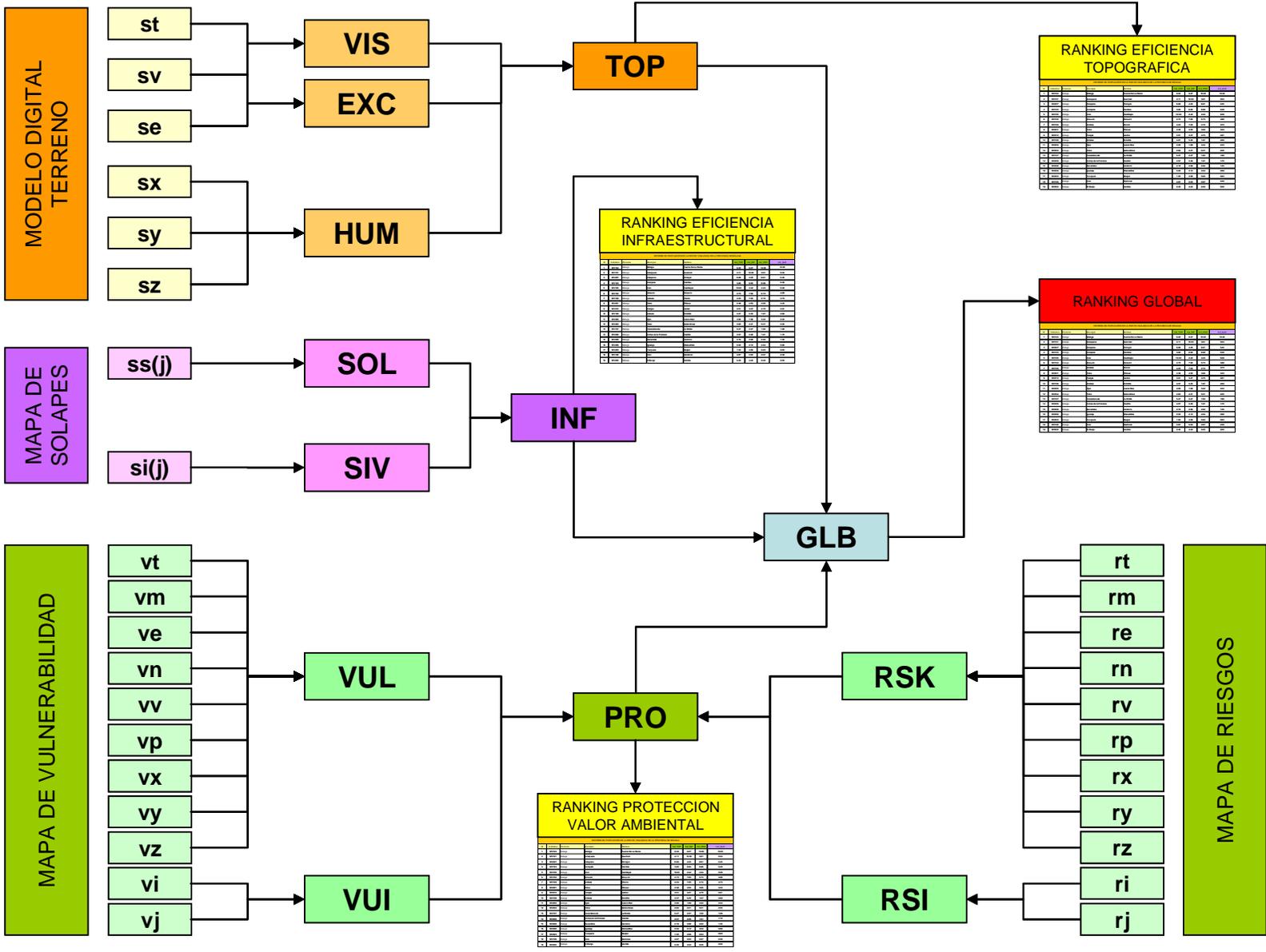
Una vez evaluados los diversos parámetros, se han analizado las correlaciones que pudieran existir entre ellos con el objeto de identificar tendencias e interpretar cada resultado. El conjunto de los 229 puestos que conforman la red en el caso de estudio dan una buena base de análisis estadístico que se ha tenido en consideración en el diseño de los indicadores.

No obstante, hay ciertos condicionantes que conviene mencionar. Por una parte, las diversas características encontradas en los puestos y que se pone de manifiesto, por ejemplo, en el gran rango de alturas que pueden encontrarse en el territorio en estudio, supone que los criterios de comparación no son unívocos. En consecuencia se ha realizado un análisis estadístico de los parámetros sobre la totalidad de la red.

En una segunda etapa se ha procedido por tanto a aplicar dichos estimadores dentro del conjunto de puestos ubicado dentro de cada provincia y a regularizar en cada ámbito geográfico el resultado que se obtiene directamente de aplicar el método de valoración calificando con 10 puntos el mejor puesto y con 0 puntos el peor. Asimismo se ha elaborado una clasificación interprovincial.

En consecuencia, para el conjunto de puestos de vigilancia pertenecientes a cada provincia se propone una clasificación por eficiencia y señalando por consiguiente los puestos que, en base a la metodología aplicada, aportan las menores y mayores eficiencias de la red tanto para el indicador final como para el resto de indicadores parciales: Topográfico, Infraestructural y de Protección del valor.

Ilustración 13. Diagrama esquemático del método de valoración multicriterio



## Parámetros básicos

Estos parámetros son los obtenidos para cada puesto de vigilancia sobre la base del modelo digital del terreno y los mapas temáticos de vulnerabilidad y riesgo, una vez efectuado el análisis de visibilidad intermedio.

En cuanto a la vulnerabilidad y el riesgo, dado que se trata de dos mapas categorizados cualitativamente con categorías 1 a 5, se han distinguido dos opciones; la primera considera todas las categorías y la segunda, denominada vulnerabilidad extrema o riesgo extremo, considera solamente las dos categorías superiores (4 y 5).

*Tabla 2. Parámetros básicos considerados en el análisis*

Símbolo	Descripción	Unidad
st	superficie total vigilada dentro del radio máximo de visibilidad	ha
sv	superficie con visibilidad directa	ha
se	superficie con visibilidad directa de modo exclusivo	ha
ss(i)	superficie visible que se divisa desde "i" puestos vecinos	ha
si(i)	superficie oculta que se divisa desde "i" puestos vecinos	ha
sx	superficie oculta (columna de humo inferior a 100 m)	ha
sy	superficie muy oculta (columna de humo inferior a 500 m)	ha
sz	superficie extremadamente oculta (columna de humo superior a 500 m)	ha
vt, rt	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona vigilada	adim
vm, rm	valor medio por celda de vulnerabilidad o riesgo en la zona vigilada	adim
ve, re	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona visible exclusiva	adim
vn, rn	valor total de vulnerabilidad o riesgo extremos en la zona visible exclusiva	adim
vv, rv	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona visible	adim
vp, rp	valor total de vulnerabilidad o riesgo extremos en la zona visible	adim
vx, rx	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona oculta	adim
vy, ry	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona muy oculta	adim
vz, rz	valor total de vulnerabilidad o riesgo en la zona extremadamente oculta	adim
vi, ri	valor total de vulnerabilidad o riesgo protegidos por otros puestos	adim
vj, rj	valor total de vulnerabilidad o riesgo extremos protegidos por otros puestos	adim

## Definición de indicadores

Se tiene que analizar un puesto de vigilancia a partir de datos cuantitativos (topografía, solapes) y cualitativos o semi-cualitativos (vulnerabilidad y riesgo).

Por tanto no puede establecerse a priori una ley física o matemática que determine qué puesto de vigilancia es más eficiente. Parece claro que el proceso pasa por valorar diferentes aspectos de modo homogéneo y posteriormente combinar los resultados siguiendo de alguna manera un juicio experto, es decir, priorizando el peso que un determinado factor o indicador tiene sobre el resultado final.

En todo caso debe ser un proceso con continuidad futura: el conocimiento de mayor información debe poder redundar en los resultados del método de puntuación, por lo tanto debe tratarse de expresiones lo más sencillas posibles y en el estadio inicial de la presente investigación, debe asumir el menor número posible de hipótesis de partida que

indudablemente condicionan el resultado final, pudiendo ocultar pautas que serían muy interesantes de cara a ajustar y perfeccionar la presente metodología.

Por ello, se ha recurrido en esta versión del método a una ponderación directa de parámetros e indicadores, procurando no combinar parámetros que en su origen, son esencialmente diferentes.

Asimismo, se tiene que:

1. Los valores proporcionados por un indicador pueden encontrarse en un rango poco previsible a priori por las muy diferentes características de la red.
2. Antes o después es necesario enfrentar valoraciones de aspectos de naturaleza diversa.
3. Se requiere la clasificación dentro de un determinado ámbito geográfico.

En estas condiciones, se ha optado por regularizar a la escala [0,10] antes de aplicar las expresiones ponderadoras en los varios momentos en que esta acción se realiza.

Dado que los coeficientes de ponderación no tienen una significación física inmediata sino que simplemente reflejan la importancia relativa de cada parámetro incidente, combinando aspectos de naturaleza diversa, los indicadores son adimensionales en todos los casos.

#### Indicadores parciales

En primer lugar se ha obtenido un conjunto de indicadores parciales que contabilizan un determinado tipo de parámetros homogéneos.

*Indicador de visibilidad (Ind\_VIS) [adim]*; este indicador o ratio se calcula como la relación entre la superficie visible y la superficie total vigilada.

$$Ind\_VIS = \frac{sv}{st}$$

*Indicador de visibilidad exclusiva (Ind\_EXC) [adim]*; este indicador o ratio se calcula como la relación entre la superficie visible con carácter exclusivo por el puesto de vigilancia, la superficie visible y la superficie total vigilada, según:

$$Ind\_EXC = \frac{se}{st} + \frac{se}{sv}$$

*Indicador de columna de humo (Ind\_HUM) [adim]*; este indicador pondera las relaciones existentes entre las superficies oculta, muy oculta y extremadamente oculta sobre la superficie total vigilada, mediante coeficientes de ponderación modificables por el usuario, según la expresión:

$$Ind\_HUM = \frac{1}{st} (c_x \cdot sx + c_y \cdot sy + c_z \cdot sz)$$

En la presente versión del método se han fijado los valores:

$$c_x = -1$$

$$c_y = -3$$

$$c_z = -7$$

De esta manera se penaliza en mayor medida las superficies ocultas a medida que su correspondiente columna de humo es mayor.

*Indicador de grado de solape (Ind\_SOL) [adim];* este indicador pondera las superficies visibles solapadas frente a la superficie visible y se calcula mediante la expresión siguiente:

$$Ind\_SOL = \frac{1}{sv} \sum_{j=1}^9 \alpha(j)ss(j)$$

$$\alpha(j) = -2j$$

En esta expresión el parámetro  $j$  representa el número de torres que solapan la visibilidad directa sobre un punto. Se penaliza progresivamente el mayor grado de solape con un multiplicador de valor 2; si se incrementa este valor se incrementa dicha penalización.

*Indicador de solape inverso (Ind\_SIV) [adim];* este indicador se calcula a partir de las diversas superficies ocultas que son visibles para otros puestos de vigilancia cercanos y se relaciona con la superficie total oculta. Se aplican coeficientes ponderadores que penalizan las zonas visibles, con mayor magnitud de penalización cuando más puestos vecinos observan la zona oculta en cuestión.

Sobre esta base el indicador puede formularse como sigue:

$$Ind\_SIV = \frac{1}{st - sv} \sum_{j=0}^9 \beta(j)si(j)$$

$$\beta(0) = 7$$

$$\beta(j) = -3j$$

En esta expresión el parámetro  $j$  representa el número de torres que divisan un punto ubicado en la zona de sombra; puede observarse que el valor del coeficiente de ponderación es positivo cuando la zona oculta también lo es para el resto de puestos, mientras que es negativo cuando algún puesto cercano divisa el punto que es oculto para el puesto de vigilancia analizado, tanto más negativo cuantos más puestos divisan dicho punto. De esta manera se penaliza esta situación.

Cabe advertir que tanto para este indicador como para el resto, de la experiencia en la aplicación de la metodología podrán proponerse modificaciones de los coeficientes de ponderación.

Por ejemplo, se ha planteado una alternativa en que la penalización se aplique cuando son un mínimo de dos las torres vecinas que visualizan de manera directa una zona oculta del puesto analizado. En definitiva, caben numerosas definiciones y de la comparación de resultados podrá concluirse cuál de ellas responde mejor a la determinación de la eficiencia real de un puesto.

*Indicador de vulnerabilidad (Ind\_VUL) [adim]*; este indicador proporciona una valoración de cómo el puesto de vigilancia analizado protege la vulnerabilidad contenida en su área de influencia.

Hay que recordar que se consideran dos medidas de vulnerabilidad, una basada en todas las clases {1, 2, 3, 4, 5} contenidas en el mapa y otra centrada en las dos clases mayores {4, 5} que se consideran como extremas y por tanto prioritarias, lo que conduce a sobreponderar su peso. En estas condiciones se define el indicador mediante:

$$Ind\_VUL = \frac{1}{st} (c_{vt} \cdot vt + c_{vm} \cdot vm + c_{ve} \cdot ve + c_{vn} \cdot vn + c_{vv} \cdot vv + c_{vp} \cdot vp + c_{vx} \cdot vx + c_{vy} \cdot vy + c_{vz} \cdot vz)$$

Se sobrepondera en este caso el que la vulnerabilidad esté protegida de manera exclusiva y asimismo se sobreponderan las medidas de vulnerabilidad extrema frente a las de vulnerabilidad total. Para ello la presente versión del método propone los valores siguientes:

$c_{vt}$	$c_{vm}$	$c_{ve}$	$c_{vn}$	$c_{vv}$	$c_{vp}$	$c_{vx}$	$c_{vy}$	$c_{vz}$
0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	-0.2	-0.5	-0.8

*Indicador de riesgo (Ind\_RSK) [adim]*; este indicador es análogo al anterior y proporciona una valoración de cómo el puesto de vigilancia analizado protege el riesgo incluido en su área de influencia.

Hay que recordar que, como en el caso precedente, se consideran dos medidas de riesgo, una basada en todas las clases {1, 2, 3, 4, 5} contenidas en el mapa y otra centrada en las dos clases mayores {4, 5} que se consideran como extremas y por tanto prioritarias, lo que conduce a sobreponderar su peso.

En estas condiciones se define el indicador mediante:

$$Ind\_RSK = \frac{1}{st} (c_{rt} \cdot rt + c_{rm} \cdot rm + c_{re} \cdot re + c_{rn} \cdot rn + c_{rv} \cdot rv + c_{rp} \cdot rp + c_{rx} \cdot rx + c_{ry} \cdot ry + c_{rz} \cdot rz)$$

Se sobrepondera en este caso el que el riesgo esté protegido de manera exclusiva y asimismo se sobreponderan las medidas de riesgo extremo frente a las de riesgo total. Para ello la presente versión del método propone los valores siguientes:

$r_{vt}$	$r_{vm}$	$r_{ve}$	$r_{vn}$	$r_{vv}$	$r_{vp}$	$r_{vx}$	$r_{vy}$	$r_{vz}$
0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	-0.2	-0.5	-0.8

*Indicador de vulnerabilidad inversa (Ind\_VUI) [adim];* este indicador proporciona una valoración de cómo la vulnerabilidad oculta en cuanto a su visión directa para el puesto de vigilancia analizado es sin embargo visible para otros puestos de vigilancia vecinos.

Teniendo en cuenta tanto la vulnerabilidad total ( $v_i$ ) como la correspondiente a las clases extremas ( $v_j$ ), se define el indicador mediante la siguiente expresión:

$$Ind\_VUI = \frac{1}{v_t - v_v} (c_{v_i} \cdot v_i + c_{v_j} \cdot v_j)$$

Donde los coeficientes toman los siguientes valores en la presente versión del método:

$$c_{v_i} = -0.2$$

$$c_{v_j} = -1$$

De manera que se penaliza especialmente que las clases de vulnerabilidad extrema, ubicándose en zonas ocultas, sean sin embargo visibles para otros puestos de vigilancia cercanos.

Indicador de riesgo inverso (Ind\_RSI) [adim]

Este indicador proporciona una valoración de cómo el riesgo oculto en cuanto a su visión directa para el puesto de vigilancia analizado es sin embargo visible para otros puestos de vigilancia vecinos.

Teniendo en cuenta tanto el riesgo total ( $r_i$ ) como la correspondiente a las clases extremas ( $r_j$ ), se define el indicador mediante la siguiente expresión:

$$Ind\_RSI = \frac{1}{r_t - r_v} (c_{r_i} \cdot r_i + c_{r_j} \cdot r_j)$$

Donde los coeficientes toman los siguientes valores en la presente versión del método:

$$c_{r_i} = -0.2$$

$$c_{r_j} = -1$$

De manera que se penaliza especialmente que las clases de riesgo extremo, ubicándose en zonas ocultas, sean sin embargo visibles para otros puestos de vigilancia cercanos.

### Indicadores de ámbito

A partir de los indicadores parciales anteriores, se han definido otros indicadores, denominados indicadores de ámbito, que concentran la calificación en tres áreas fundamentales, la topográfica, la infraestructural y la relativa a la protección del riesgo y la vulnerabilidad.

Previamente a la combinación de tales indicadores parciales, se procede a su regularización en el rango [0, 10] para el conjunto de puestos de vigilancia considerado, de cara al análisis en el ámbito provincial.



De este modo, cada indicador calificará con un 10 al mejor puesto de vigilancia en cada ámbito y con un 0 al peor.

Una vez regularizados se procede a aplicar la correspondiente expresión de ponderación proporcionando la calificación global en cada ámbito.

*Indicador del ámbito topográfico (Ind\_TOP) [adim];* este indicador se basa en los indicadores de visibilidad, visibilidad exclusiva y columna de humo y está definido por:

$$Ind\_TOP = c_{VIS} \cdot Ind\_VIS + c_{EXC} \cdot Ind\_EXC + c_{HUM} \cdot Ind\_HUM$$

Los coeficientes de ponderación que se han elegido en la presente versión del método son iguales a la unidad, indicando que se pondera por igual cada uno de los indicadores parciales.

*Indicador del ámbito infraestructural (Ind\_INF) [adim];* este indicador se basa en los indicadores de solape y solape inverso y está definido por:

$$Ind\_INF = c_{SOL} \cdot Ind\_SOL + c_{SIV} \cdot Ind\_SIV$$

Los coeficientes de ponderación que se han elegido en la presente versión del método son iguales a la unidad, indicando que se pondera por igual cada uno de los indicadores parciales.

*Indicador del ámbito de la protección del valor (Ind\_PRO) [adim];* este indicador se basa en los indicadores de vulnerabilidad, vulnerabilidad inversa, riesgo y riesgo inverso y está definido por:

$$Ind\_PRO = c_{VUL} \cdot Ind\_VUL + c_{RSK} \cdot Ind\_RSK + c_{VUI} \cdot Ind\_VUI + c_{RSI} \cdot Ind\_RSI$$

Los coeficientes de ponderación que se han elegido en la presente versión del método son iguales a la unidad, indicando que se pondera por igual cada uno de los indicadores parciales.

### Indicador global

Los indicadores de ámbito anteriores ya proporcionan una medida de la eficiencia en cada uno de los ámbitos considerados.

Adicionalmente, para proporcionar una clasificación combinada se plantea el uso de una expresión ponderadora lineal y análoga a las anteriores, según:

$$IND\_GLB = c_{TOP} \cdot Ind\_TOP + c_{INF} \cdot Ind\_INF + c_{PRO} \cdot Ind\_PRO$$

Los coeficientes de ponderación que se han elegido en la presente versión del método son iguales a la unidad, indicando que se pondera por igual cada uno de los indicadores parciales.

Sin embargo tales valores se corresponden con una propuesta inicial que habrá seguramente de ser ajustada en el futuro a fin de que la metodología de valoración en su totalidad respete los dictados del análisis experto.

### Cambio de escala

En diversos momentos se ha aludido al cambio de la escala de valoración, desde el rango experimental obtenido, que es habitualmente impredecible, a una escala [0, 10] que se considera adecuada a los fines del estudio.

Esta adaptación se ha realizado mediante el siguiente procedimiento:

$$m = \min\{IT_i\}_{i=1,\dots,N}$$

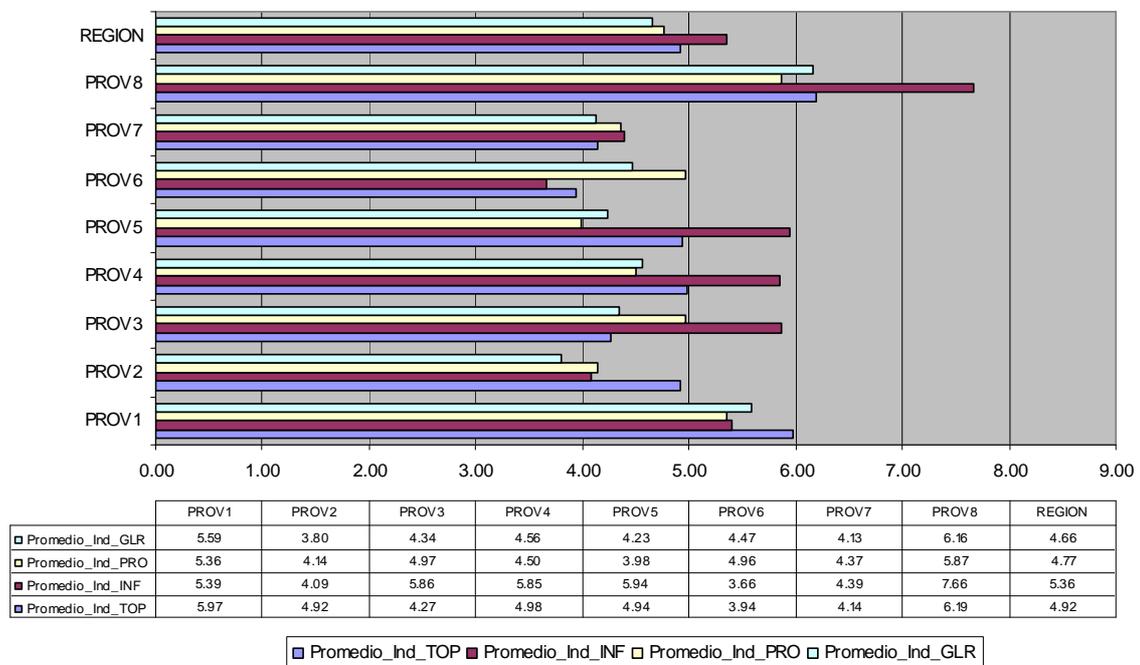
$$M = \max\{IT_i\}_{i=1,\dots,N}$$

$$Ind^* = 10 \frac{Ind - m}{M - m}$$

Donde *Ind* es el indicador que se está regularizando e *Ind\** el indicador regularizado.

### Resultados del análisis multicriterio

Aplicando la metodología anterior a la región, que se ha considerado compuesta por 8 provincias, se han obtenido los resultados adjuntos. Cabe destacar la heterogeneidad en cuanto a la eficiencia de la infraestructura de vigilancia entre diversos ámbitos territoriales y la distinta descomposición de calidades entre diferentes ámbitos, es decir, en unos casos resulta mejor el indicador topográfico, otras veces el infraestructural o de protección, pero no existe una tendencia uniforme como puede apreciarse.



*Ilustración 14. Resultados del análisis multicriterio en los ámbitos territoriales.*

## Módulo de optimización

En este módulo se parte de un grupo de torres de vigilancia. En primer lugar se construyen mediante la aplicación informática los mapas conjuntos de visibilidad, solape, vulnerabilidad y riesgo.

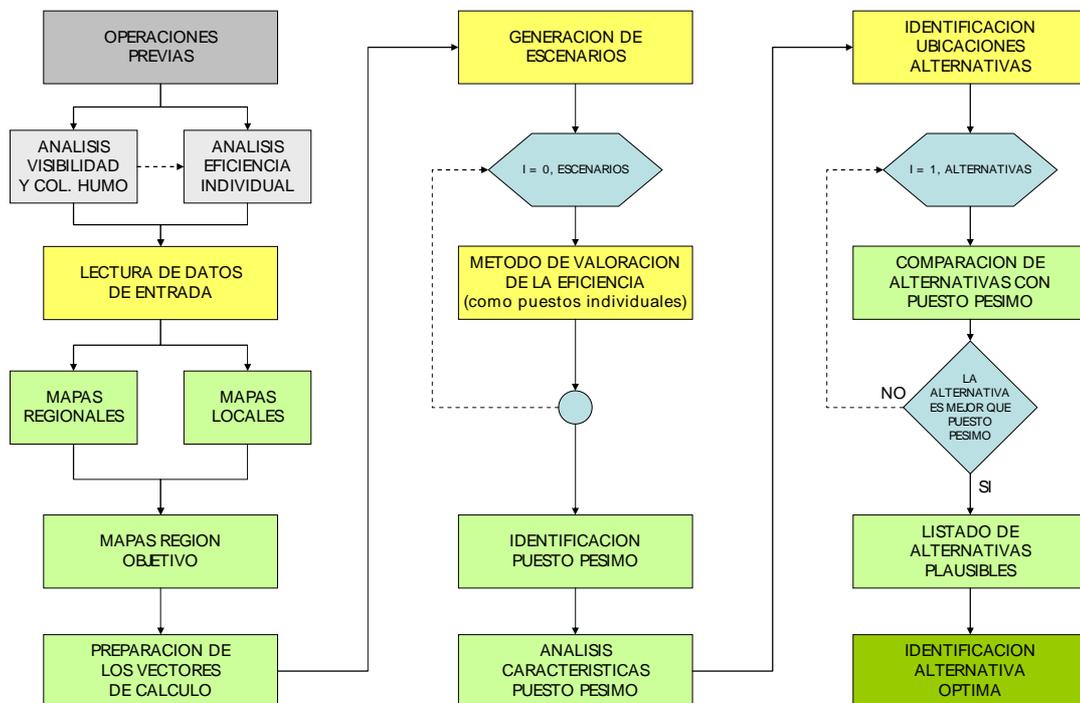


Ilustración 15. Procedimiento general para optimización de redes de vigilancia.

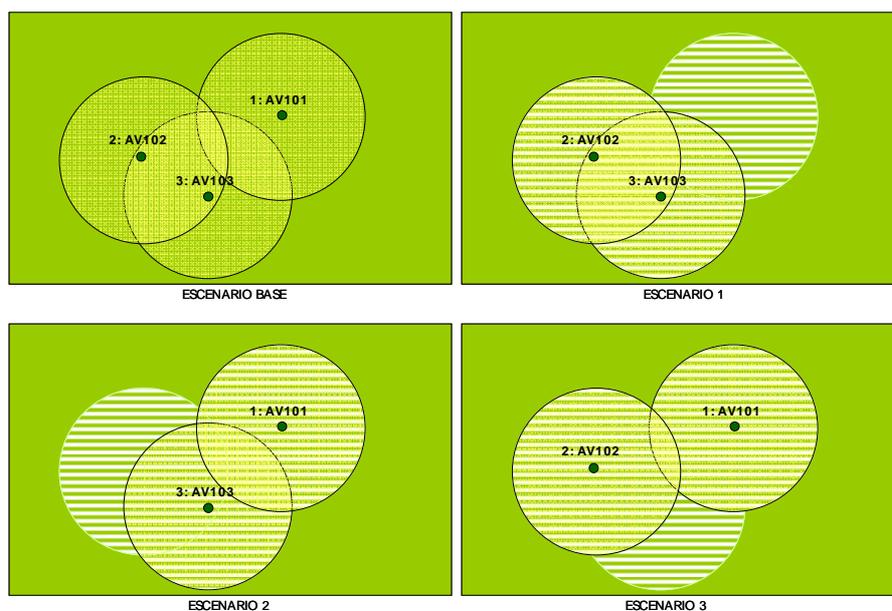
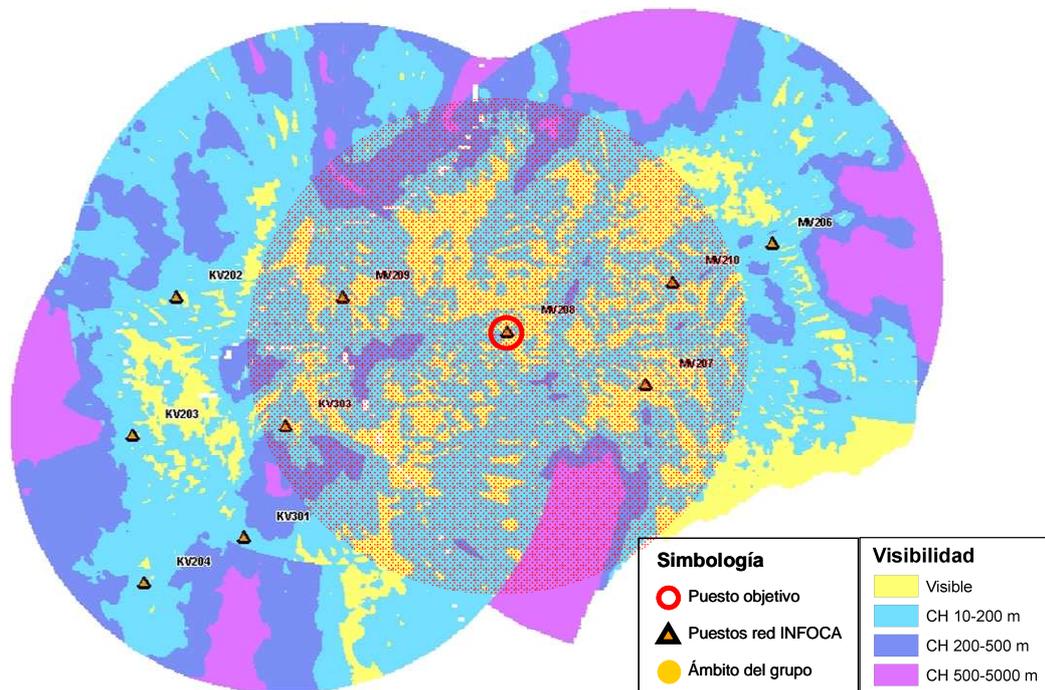


Ilustración 16. Configuración de los escenarios.



*Ilustración 17. Visibilidad conjunta de un grupo de puestos para su optimización.*

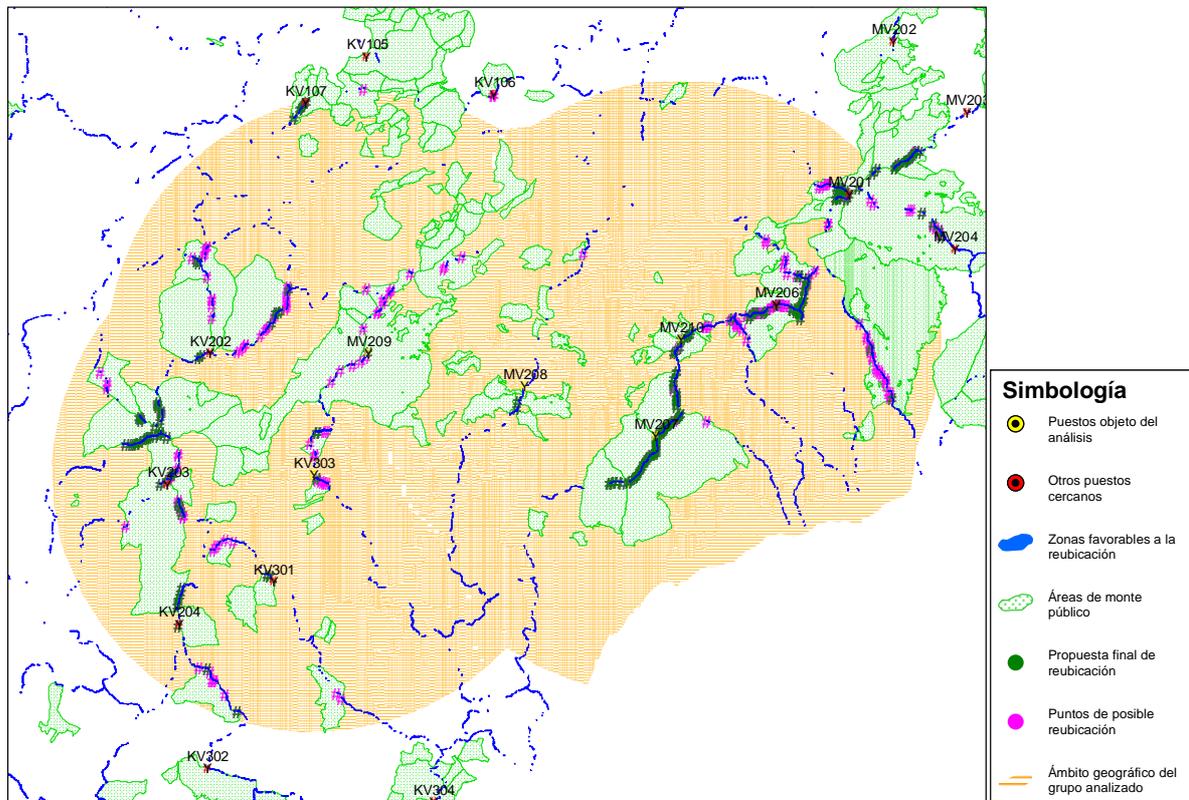
El segundo paso consiste en evaluar, para el grupo de  $N$  torretas,  $N+1$  escenarios donde el escenario base está conformado por las  $N$  torretas y los  $N$  escenarios restantes se configuran eliminando cada vez una de las torretas del grupo.

Posteriormente se analizan los  $N+1$  escenarios, siguiendo un procedimiento análogo al método de valoración multicriterio previamente descrito. Los escenarios se clasifican entonces mediante los indicadores de ámbito y global.

De los resultados, se selecciona el escenario óptimo (salvo el escenario base). Dicho escenario óptimo se corresponde con aquél que, al eliminar uno de los puestos, mantiene una eficiencia máxima. El puesto eliminado es el puesto pésimo dentro del grupo. Hay que señalar que este puesto no tiene necesariamente que coincidir con el que obtiene la peor valoración individualmente, puesto que al analizarlo desde una perspectiva de grupo, la interacción con el resto de puestos adquiere importancia y por tanto se identifica precisamente el puesto que en el seno del grupo tiene una eficiencia inferior.

El paso siguiente consiste en proponer alternativas viables para la reubicación. Para ello se consideran en el análisis los mapas de montes de propiedad pública, divisorias hidrológicas y caminos forestales. Así se restringe el espacio de búsqueda de ubicaciones alternativas.

Aquéllos puntos que se ubican en zona pública, sobre las divisorias y con acceso posible para vehículos motorizados, se proponen como ubicaciones potencialmente posibles para desplazar el puesto que previamente se ha calificado como pésimo.



*Ilustración 18. Resultados del análisis: propuesta de puntos para la reubicación.*

La tarea final del proceso consiste en evaluar dicho conjunto de puntos y comparar su eficiencia aparente con la del punto donde se ha eliminado previamente el puesto de vigilancia. Esto se lleva a cabo comparando sus valores respectivos en el mapa de intervisibilidad, designando por tal el mapa que asigna a cada punto del territorio la superficie que divisa dicho punto de modo directo.

Los puntos cuya superficie divisada de modo directo es mayor que la correspondiente al puesto eliminado se proponen como puntos plausibles para la reubicación. Tales puntos se distribuyen a veces en conjuntos de puntos cercanos que indican que una determinada zona, de manera difusa, es adecuada para la reinstalación.

Con esta información el planificador dispone ya de una guía para dar soporte a la toma de decisiones. El sistema no puede proporcionar inequívocamente la ubicación óptima puesto que determinados aspectos del análisis son subjetivos y exclusivos del juicio experto (red de transmisión de radiofrecuencia u otros aspectos sociopolíticos, estratégicos o económicos).

Las actividades posteriores consistirían por tanto en un análisis punto a punto o zona a zona, con inspección de campo y análisis experto de la idoneidad. Una vez identificada la propuesta definitiva puede entonces usarse el programa informático para evaluar su visibilidad, estudiar la zona oculta y calcular su eficiencia siguiendo el proceso descrito anteriormente.

Se trata en definitiva de un método iterativo que permite optimizar las redes de vigilancia sin descartar la componente de análisis subjetivo por parte del técnico experto, pero



utilizando intensamente los recursos informáticos y de disponibilidad actual de información geográfica distribuida, tales como los modelos digitales del terreno, coberturas de propiedad, tipo y uso del suelo, cubierta vegetal, red de comunicaciones, vulnerabilidad y riesgo, etc.

## **BIBLIOGRAFIA**

Albini F. A. (1986). "Wildland fire spread by radiation –a model including fuel cooling by natural convection". *Combustion Science and Technology*, 45: 101 – 113.

Albright D., Meisner B. N. (1999). "Clasificación de fire simulation systems". *Fire Management Notes*, 59(2): 5-12.

Burgan, Robert E.; Rothermel, Richard C. 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.

Catchpole T., de Mestre N. (1986). "Physical models for a spreading line fire". *Australian Forestry*, 49(2): 102–111.

Cukier, R.I., Fortuin, C.M., Shuler, K.E., Petschek, A.G., Schaibly, J.H. (1973): Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. Part I: theory. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 59, No. 8, pp 3873-3878.

Dupuy Jean-Luc (1997). "Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et proposition de modèles". Tesis Doctoral. Université Claude Bernard – Lyon I.

Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wild land fuels. Ogden, Utah (USA). USDA Forest Service.

Morandini F., Santoni P. A., Balbi J. H. (2001). "Fire front width effects on fire spread across a laboratory scale sloping fuel bed". *Combustion Science and Technology*, 166: 67-90.

Pastor E., Zárate L. Planas E., Arnaldos J. (2003). "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour". *Progress in Energy and Combustion Science*, 29: 139-153

Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K. (1999): A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, Vol. 41, No. 1, pp 39-56.

Weber R. O. (1991). "Modelling fire spread through fuel beds". *Progress Energy Combustion Science*, 17: 67-82.