

LA MEJORA DEL MAPA DIARIO DE RIESGO DE INCENDIO FORESTAL EN CATALUÑA

BURRIEL MORENO¹, J. A.; CASTRO DORIA², F. X.; MATA BRETÓN¹, T.; MONTSERRAT AGUADÉ², D.; GABRIEL DE FRANCISCO², E.; IBÀÑEZ I MARTÍ¹, J. J.

¹CREAF

Facultat de Ciències
Universitat Autònoma de Barcelona
08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès)
j.angel@creaf.uab.cat

²Servei de Prevenció d'Incendis Forestals
Departament de Medi Ambient i Habitatge
Generalitat de Catalunya

Carretera de Sabadell a Sta. Perpètua de Mogoda, km 4,5
08130 Sta. Perpètua de Mogoda

RESUMEN

Una de las herramientas útiles en la prevención de incendios forestales es el conocimiento del riesgo. Para ello, en Cataluña se elabora diariamente el mapa de riesgo de incendio forestal, por parte del Servicio de Prevención de Incendios Forestales (SPIF) de la Generalitat de Cataluña.

Desde hace unos años, el SPIF y el CREAM colaboran en la mejora del mapa. El objetivo del proyecto es crear un sistema de representación del riesgo de incendio forestal que recoja tanto la información y los conocimientos adquiridos a lo largo de los últimos años, como aquellos que se van produciendo de nuevo. Esta mejora se hace en base a la integración de las líneas y metodologías de trabajo que habitualmente se utilizan en la confección del mapa, en una herramienta informática modular, abierta y manejable, que se basa principalmente en el SIG-MiraMon. Así mismo, se mejoran las metodologías utilizadas.

Hasta el momento, las principales tareas realizadas corresponden a la elaboración o mejora de diferentes capas de información geográfica útiles a la hora de definir el riesgo de incendio como son, entre otros, la cobertura de cargas de vegetación, los mapas de modelos de combustible e inflamabilidad, o el mapa de continuidad de la masa forestal. También se ha efectuado un análisis base mediante sistemas de información geográfica de los perímetros de incendios de los últimos 30 años y de las características fisiográficas y de vegetación de las zonas quemadas en estos incendios. Así mismo, se ha iniciado la generación y determinación de los criterios de valoración del riesgo y la aportación de cada una de las capas que se utilizan para lograr el mapa final de riesgo de incendio. Finalmente, se ha procedido a la validación de los resultados de la mejora del mapa de riesgo.

Palabras clave

Incendio forestal, prevención, SIG, cartografía ambiental.

ABSTRACT

One of the most useful tools for preventing forest fires is a knowledge of risk.. For this reason, the map of forest fire risk is produced on a daily basis in Catalonia by the Forest Fire Prevention Service (SPIF) of the Department of the Environment and Housing (Generalitat of Catalonia).

During recent years, the SPIF and CREAM have been working together in order to improve the map. The aim of the project is to create a system to show the risk of forest fire which combines the

information and knowledge that have been acquired over the years and that which is currently being produced. This improvement is based on the integration of the different lines of research and work methodologies that are commonly used in the production of the map into a modular computer tool which is open and easy to use and which is principally based on the MiraMon GIS. Moreover, the methodologies used are also being improved.

Until now, the main tasks carried out are those related to the production or improvement of different layers of geographic information which are useful to define fire risk. These include, among others, vegetation cover, maps of combustible and flammability models, or the map of forest mass continuity. A base analysis has also been carried out using geographic information systems of the perimeters of fires of the last 20 years and of the physiographical and vegetation characteristics of the areas that were burnt in these fires. Furthermore, work has begun in order to generate and determine the criteria for risk evaluation and the contribution of each of the layers used in the production of the final fire risk map. Finally, the results of the improvement of the fire risk map have been validated.

Keywords

Forest fire, GIS, environmental mapping.

1. INTRODUCCIÓN

Explicar conceptualmente el inicio y evolución de un incendio forestal es relativamente sencillo. Ahora bien, territorializar el riesgo de incendio en el espacio y seguir su evolución en el tiempo es una tarea mucho más complicada. En el cálculo del riesgo de incendio intervienen numerosas variables de vegetación, meteorológicas y orográficas con escalas de variación diferentes que oscilan entre la escala horaria (meteorología) y la escala plurianual (distribución y evolución de la vegetación). Actualmente no hay una única herramienta que unifique todas estas variables y sea capaz de proporcionar una visión completa del riesgo de incendio. Se han diseñado muchas herramientas que, con los datos disponibles, intentan describir territorial y temporalmente el riesgo de incendio pero la complejidad antes comentada hace que resulten claramente insuficientes cuanto más se las necesita. Se presenta un intento de conjugar las diferentes herramientas existentes en un esfuerzo por mejorar la definición del riesgo de incendio.

Una de las herramientas importantes en la lucha contra los incendios forestales en Cataluña es el mapa de riesgo que durante todo el año elabora el Servicio de Prevención de Incendios Forestales (SPIF), del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda (DMAH). El mapa hace una previsión de la distribución del riesgo de incendio forestal en Cataluña y se actualiza diariamente. Este mapa se genera agrupando la información que se recoge procedente de las diversas fuentes que ofrecen datos relevantes sobre la evolución del riesgo de incendio forestal. El mapa es la herramienta para dar apoyo a las decisiones que día a día se toman sobre el riesgo de incendio forestal en la Dirección General del Medio Natural, como la activación del plan alfa, la coordinación con las Asociaciones de Defensa Forestal y con bomberos y otras medidas preventivas.

Desde hace unos años, el SPIF y el Centre de Recerca Ecològica y Aplicacions Forestals (CREAF) colaboran en la mejora del mapa. Este desarrollo forma parte del proyecto GRINFOMED+MEDIFIRE que ha sido financiado por el Programa Europeo INTERREG 3B MEDOCC. El objetivo del proyecto es crear un sistema de representación del riesgo de incendio forestal que recoja tanto la información y los conocimientos adquiridos a lo largo de los últimos años, como aquellos que se van produciendo de nuevo. Esta mejora se hace en base a la integración de las líneas y metodologías de trabajo que diariamente se utilizan en la confección del mapa, en una herramienta informática modular, abierta y manejable, que se basa principalmente en el SIG-MiraMon. Así mismo, se mejoran las metodologías utilizadas.

2. EL MAPA DE RIESGO: EL DIA A DIA

Los factores que determinan la evolución del riesgo de incendio forestal se pueden dividir en dos grandes categorías: los estructurales y los coyunturales. Para distinguirlos rápidamente, se podría decir que los primeros son aquéllos que no varían de un día para otro (altitud, orientación, pendiente, usos del suelo, tipo de vegetación), mientras que los segundos sí que varían diariamente o, incluso, de una hora a otra (tiempo meteorológico y estado de la vegetación viva y muerta). El actual mapa de riesgo diario, a la espera de incorporar las nuevas herramientas que aquí se presentan, se determina básicamente siguiendo estos factores coyunturales. La información sobre el estado de la vegetación y de la atmósfera no presenta una resolución temporal y espacial equivalente, siendo ésta una de las principales dificultades a las que tiene que hacer frente el mapa de riesgo actualmente vigente.

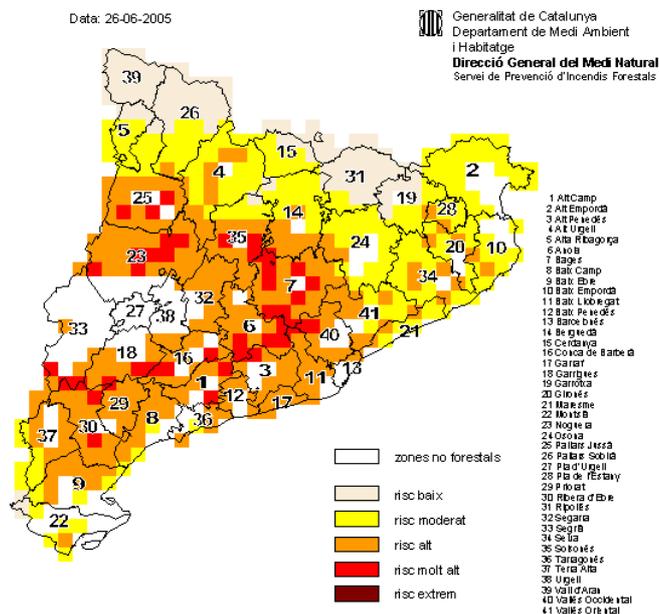
Con respecto al estado de la vegetación, se obtienen medidas directas del contenido de agua de determinadas especies vegetales consideradas representativas mediante la recogida quincenal de muestras en nueve parcelas fijas. El dato obtenido por este procedimiento tiene la ventaja de cuantificar exactamente el contenido de agua de la vegetación viva, siendo éste una de las variables clave en la evolución del riesgo que se quiere medir. Sin embargo, tiene el enorme inconveniente de un coste temporal muy por encima de la escala diaria que exige el mapa de riesgo y una resolución espacial de difícil extrapolación más allá de los puntos de muestreo. Un índice perceptivo de los Agentes Rurales que valoran el estado general de la vegetación de las comarcas, también quincenalmente, intenta complementar esta información. Las medidas directas se convierten pues, en una herramienta de confirmación a posteriori, dejando la decisión diaria del riesgo en las medidas indirectas. Las medidas indirectas son los índices meteorológicos de riesgo. Éstos intentan simular, esencialmente, el estado del llamado combustible muerto a partir de la meteorología previa y la presente. Hace falta hacer notar que estos índices no hacen referencia al combustible vivo, aunque como éste también varía siguiendo los mismos factores atmosféricos, al final los índices meteorológicos se consideran buenos indicadores del conjunto. El índice usado en el SPIF es el canadiense (Canadian Forestry Service, 1987), tanto en su versión final del *Fire Weather Index*, como en sus índices previos, y se calcula a través de la red de estaciones meteorológicas automáticas del Servicio Meteorológico de Cataluña.

Con respecto al tiempo meteorológico, aparte de su participación en la elaboración de los índices de riesgo, sus registros se usan también por vías directas e indirectas. La vía directa son los registros meteorológicos acumulados, que sirven para valorar el tiempo pasado, por ejemplo la sequía acumulada, y los registros horarios recientes, que sirven para conocer la última hora del estado atmosférico y, si se quiere, para elaborar índices de riesgo horario del tipo I87 (Carrega, 1997). Uno de los datos más usados es la comparación de los datos meteorológicos de la última hora antes de la ejecución del mapa con la misma hora del día anterior. Ésta comparativa da una idea de qué zonas mejoran y cuáles empeoran respecto del día anterior. Hay que indicar que, debido a la inercia del riesgo, el mapa de riesgo del día anterior acostumbra a ser un buen punto de partida para el mapa de la jornada en curso, de aquí el interés de una comparativa con la jornada previa. Con la misma finalidad, estos datos meteorológicos de la última hora y de toda la semana previa también se comparan con los registros históricos a través de percentiles.

El mapa de riesgo, sin embargo, no tiene bastante con saber cuál ha sido la evolución meteorológica y del riesgo en las últimas horas. El mapa tiene que hacer un pronóstico para el día en curso y aquí entran en juego los modelos de predicción meteorológica. Gracias a ellos, se puede conocer, con una anticipación desde horas hasta dos o tres días y más, los valores

sinópticos previstos para Cataluña o cualquier otro lugar. Aparte de consultar las predicciones oficiales, actualmente el SPIF usa los datos sinópticos directamente con dos finalidades: la búsqueda de análogos para el día en curso y la revisión de la actividad de fuego histórica en situaciones sinópticas afines.

La búsqueda de análogos consiste en comparar los datos meteorológicos previstos a escala sinóptica con el los datos históricos disponibles con la misma resolución (NOAA, <http://nomads6.ncdc.noaa.gov>). Mediante un análisis clúster ejecutada con SPSS©, se buscan los registros medios diarios de los últimos 10 años más próximos al registro medio diario previsto. Las variables que intervienen en el clúster son los valores tipificados de la altitud geopotencial, la temperatura, la humedad relativa y las componentes zonal y meridiana del viento, todas ellas referidas a la topografía de 850hPa. El uso preferente de los datos sinópticos en 850hPa tiene mucho que ver con los buenos resultados que la gestión de estos datos ha dado para la detección de los episodios críticos de fuego que afectan a Cataluña (Montserrat, 2000 y 2001). Las fechas más próximas según el clúster son revisadas a nivel de mapas sinópticos hasta escoger la fecha más apropiada para ser considerada un bueno similar. Como es una fecha de los últimos 10 años se pueden consultar los valores que aquel día registraron las estaciones automáticas y las usaron para hacer correr el índice canadiense para el mediodía del día en curso. Este canadiense en previsión se convierte en la base del mapa de riesgo previsto para el día en curso y, mediante el método de interpolación llamado *kriging*, disponible en Surfer©, los valores de las estaciones se extienden para toda la cobertura forestal de Cataluña. Este método exige una revisión manual de los valores obtenidos debido a la heterogénea representatividad de las estaciones meteorológicas automáticas.



La revisión de los incendios históricos consiste en cruzar la base de datos histórica de incendios forestales del SPIF con el reanálisis sinóptico usando como criterios de la consulta la presencia de valores medios diarios a 850hPa parecidos o menos desfavorables que los previstos para la jornada en curso. Esta herramienta da como resultado un mapa de incendios históricos con situaciones sinópticas afines a las del día en curso que se usa en la revisión final

de edición del mapa. También los incendios de los últimos días se revisan en forma de mapa de fuegos acumulados con el fin de detectar puntos de actividad de fuego elevada reciente.

Por último, la edición definitiva del mapa (figura 1) consiste en adaptar el índice canadiense previsto, matizado por el resto de informaciones comentadas, y adaptarlo a una escala de 1 a 5, correspondiente a los niveles de riesgo bajo, moderado, alto, muy alto y extremo. El mapa obtenido se actualiza diariamente y se puede consultar en la web del DMAH (http://mediambient.gencat.net/cat/el_medi/incendis/mapa_risc.jsp).

3. EL MAPA DE RIESGO: LA MEJORA

Gracias al presente proyecto, se han producido innovaciones en la elaboración del mapa, ya sea por nuevas aportaciones o por mejora de información ya existente. De entre ellas, cabe destacar:

- Modelos de combustible y modelos de inflamabilidad.
- Generación de coberturas de cargas de vegetación.
- Análisis de los perímetros de incendios de los últimos 30 años y de las características fisiográficas y de vegetación de las zonas quemadas.

3.1 Modelos de combustible y modelos de inflamabilidad

Los modelos de combustible, relacionados con la propagación de los incendios, corresponden a los determinados por Rothermel (1983); para su determinación en campo se utilizan unas claves fotográficas específicas de los ambientes peninsulares (MAPA, 1989). Los modelos de inflamabilidad se relacionan con el riesgo de ignición y corresponden a la definición que el CREAM aplicó en el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) en Cataluña (Ibáñez *et al.*, 2005).

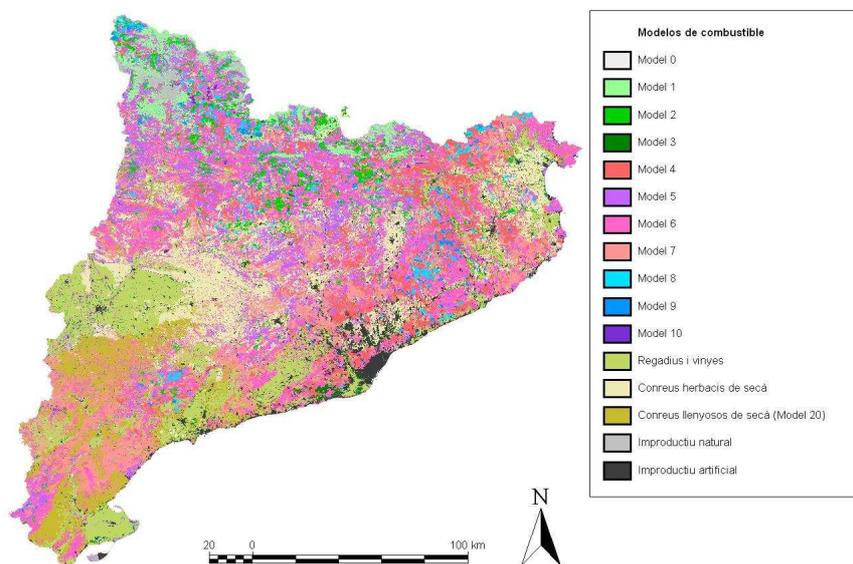


Figura 2. Mapa de modelos de combustible de Cataluña.

Fuente: Elaboración CREAM.

La elaboración de estas dos capas consta de dos fases. En la primera se consideran sólo las zonas arboladas y en la segunda las correspondientes a matorral, prados y cultivos. En las zonas arboladas, la asignación de los modelos de combustible se realizó en el campo mediante una clave fotográfica durante el muestreo del IFN3 según la estructura y cantidad de material vegetal vivo o muerto de las parcelas (Mata *et al.*, 2005). En aquellos casos (4%) en

que el modelo asignado en el campo era del grupo de los restos silvícolas, se procedió a una asignación de un nuevo modelo ya que las actuaciones silvícolas son temporales y se ha querido evitar la excesiva temporalidad de los mapas. La asignación de los modelos de inflamabilidad se efectuó en gabinete a partir de la información de las parcelas según la fracción de cabida cubierta (FCC) de los diferentes estratos verticales (arbóreo, arbustivo y herbáceo), la FCC de las especies clasificadas como muy inflamables en cada estrato y el tipo de hojarasca encontrada (laxa o compacta). De esta manera, si la FCC del estrato arbustivo-herbáceo superaba el 70% (o aún siendo menor, la hojarasca era compacta) el modelo se asignaba según la FCC de las especies muy inflamables de dicho estrato, y si la FCC era menor que el 70% y la hojarasca laxa se determinaba el modelo a partir de la FCC de las especies muy inflamables del estrato arbóreo. El resultado es una clasificación que distingue 11 modelos de menor a mayor inflamabilidad de la vegetación desde el modelo 0 (FCC de 0% a 9% de especies inflamables) hasta el modelo 10 (FCC superior al 100% de especies inflamables).

Como ya se ha dicho, la primera fase consiste en la extensión de la información del modelo de combustible y del modelo de inflamabilidad de cada parcela por zonas arboladas más o menos homogéneas según la especie o especies dominantes, el estado de la masa forestal y la ocupación. Estas zonas vienen determinadas por los estratos que el Mapa Forestal de España define en Cataluña. La extensión de dicha información se hace mediante el algoritmo de Thiessen dentro de cada zona, que a diferencia de otros métodos de interpolación, no genera valores intermedios entre el de origen y el de destino sino que extiende ambos hasta la mitad de su distancia.

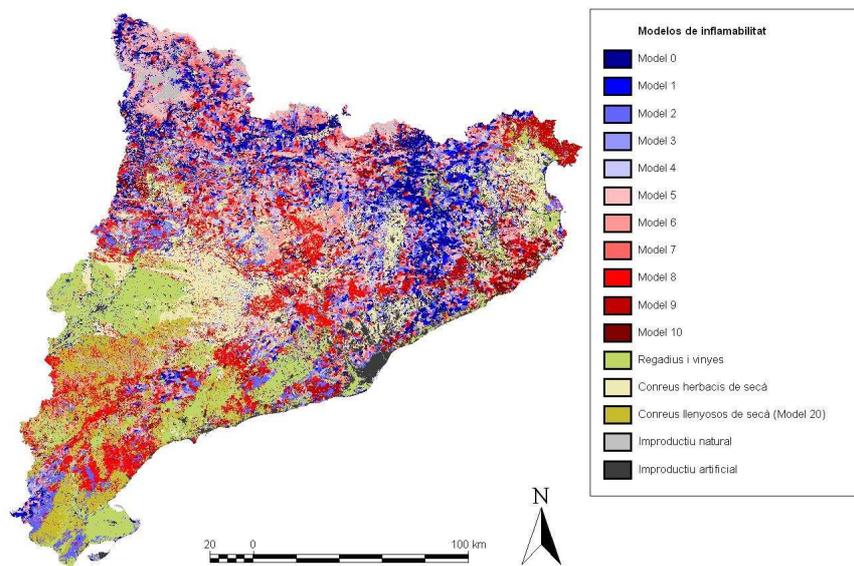


Figura 3. Mapa de modelos de inflamabilidad de Cataluña.

Fuente: Elaboración CREAMF.

La segunda fase consiste en la asignación de un modelo de combustible y de un modelo de inflamabilidad en las zonas correspondientes a matorrales, prados y cultivos extraídas de la Cartografía de los Hábitats de Catalunya (CHC; elaborado por la Unidad de Botánica de la Universidad de Barcelona entre 1998 y 2003; fuente: DMAHb; para más información, consúltase Vigo *et al.*, 2005). Dicha cartografía distingue cultivos herbáceos, leñosos, de secano y regadío, formaciones de matorral según especies o agrupaciones presentes, prados de alta montaña o supraforestales, prados del piso basal, etc. En el caso de los cultivos se han

definido tres nuevos modelos atendiendo a un posible comportamiento del fuego en ellos. Se distinguen así, regadíos y viñas (con escasa incidencia), cultivos herbáceos de secano (donde un incendio puede actuar de diferente manera según se haya segado o no) y cultivos leñosos de secano (olivos, almendros, etc. que pueden verse afectados por un fuego de copa).

Este proceso en dos fases ha permitido obtener un mapa de modelos de combustible (figura 2) y uno de modelos de inflamabilidad (figura 3) para todo el territorio añadiendo las superficies correspondientes a improductivo artificial (zonas urbanas, vías de comunicación, etc.) e improductivo natural (el resto de categorías forestales no consideradas en la designación de modelos como rocas y otras zonas de escasa o nula vegetación, aguas continentales, etc.).

3.2 Generación de coberturas de cargas de vegetación

Hasta ahora, no existía para toda Cataluña un mapa que reflejase la cantidad de combustible por unidad de superficie que puede quemar en un incendio forestal, y tampoco que diferencie este combustible por fracciones o tipo de vegetación (biomasa de ramas y hojas de los árboles, hojarasca, matorral, etc.) La importancia de este tipo de mapas radica en el hecho de que no se comportarán igual incendios producidos en zonas con diferente cantidad de combustible para quemar. Este hecho ha de tenerse en cuenta a la hora de elaborar el mapa de riesgo de incendio para priorizar una u otra zona.

Se han generado las siguientes coberturas:

- Carga total o cantidad de combustible
- Carga en el sotobosque
- Carga por fracción (consta de seis capas complementarias)
- Carga de hojarasca

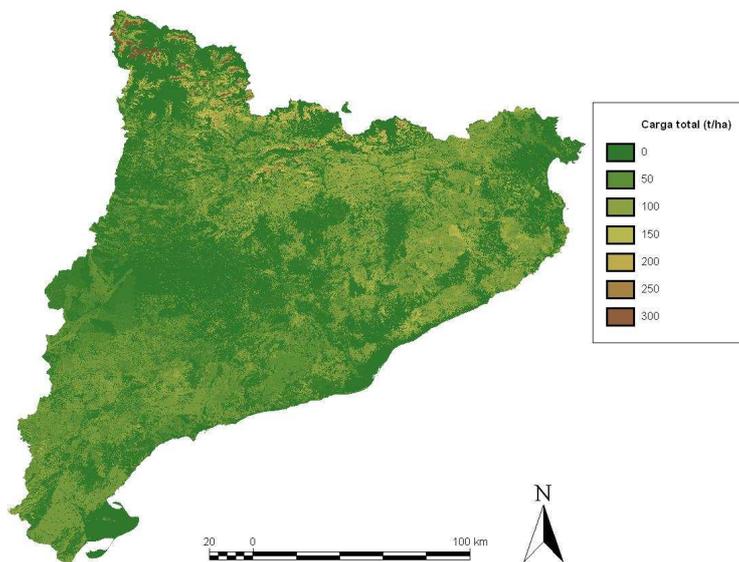


Figura 4. Mapa de carga total o cantidad de combustible de Cataluña.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Carga total o cantidad de combustible

Es la cantidad de combustible (en t/ha) en las diferentes áreas vegetadas (bosque, matorral, herbazal y cultivos) definidas en la CHC. En el bosque, la información procede de los datos de biomasa aérea total por especie según el Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC; para más información, véase Gracia *et al.*, 2000-2004). En el matorral la

información proviene en parte de los resultados de Pla (2002). En el resto de matorrales, en los herbazales y en los cultivos, la información procede de la asignación establecida en Marull *et al.* (2004). Para completar la carga total (figura 4), a las zonas de bosque se les ha sumado la carga del sotobosque (apartado 3.2.2) y la de hojarasca (apartado 3.2.4).

3.2.2 Carga en el sotobosque

Corresponde a la cantidad de combustible (en t/ha) en las áreas de sotobosque. Proviene de extender en las zonas de bosque la información de carga de matorral según Pla (2002) y Marull *et al.* (2004)

3.2.3 Carga por fracción

Consta de una serie de capas, cada una para una fracción diferente de la biomasa de ramas (en t/ha) en la zona de bosque. La información utilizada para generar estas capas proviene de los datos de pesos y diámetros recogidos por el CREAM durante el muestreo del IFN3 (Ibáñez *et al.*, 2005). Estos datos, inicialmente se tomaron para el cálculo de la relación peso fresco/peso seco en hojas y ramas de diferentes tamaños y por eso no fue un muestreo exhaustivo en todo el territorio. Sin embargo dichos datos proporcionan también la base para el cálculo de las relaciones entre el diámetro de las ramas y el peso de las diferentes fracciones (hojas y ramas de diferentes tamaños). Estas relaciones se aplicaron a las estaciones del IEFC ya que durante su muestreo se recogieron datos de la cantidad de ramas que contienen determinados árboles de las parcelas por intervalos de grosor. Esta medida nos permite calcular la biomasa de hojas y ramas de diferentes tamaños para cada árbol de la parcela, para cada parcela o para cada especie. Este último valor fue el que se aplicó en las diferentes formaciones específicas que define la CHC. Las fracciones contempladas son:

- Biomasa de la fracción de ramas menor de 5 mm. Equivale a ramillas de diámetro hasta 5 mm.

- Biomasa de hojas.

- Biomasa de la fracción de ramas entre 5 mm y 50 mm (5 cm). Equivale a ramillas de diámetro entre los 5 mm y los 5 cm.

- Biomasa de la fracción de ramas mayor de 50 mm. Equivale a la parte de las ramas con un diámetro mayor de 5 cm. Esta fracción está sesgada ya que sólo aquellos árboles de un cierto diámetro tendrán ramas de esta fracción. Es evidente que una encina de 4 o 5 pies o retoños de 5-10 cm cada uno no tendrá esta fracción. Además, la medida de esta fracción depende mucho de por dónde se hayan cortado las ramas que sí tienen esta fracción (no es lo mismo cortar a raíz del tronco y medir la parte que tiene más de 5 cm de diámetro, que cortar en media rama). Por eso el cálculo de esta fracción es más complejo.

- Biomasa de ramas. Equivale a la suma de todas las anteriores, y por lo tanto a la biomasa de ramas.

- Biomasa del tronco. Es la manera de paliar lo que se ha comentado de la biomasa de la fracción mayor de 5 cm. A partir de la Biomasa total en bosque (descontando las cargas de hojarasca y sotobosque), restando la suma de fracciones (biomasa de ramas) se obtiene el total de la fracción mayor de 5 cm incluido el tronco (con corteza).

3.2.4 Carga de hojarasca

La carga de hojarasca consiste en una capa donde en las zonas de bosque se da el valor (en t/ha) de hojarasca acumulada según los datos del Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC). (Gracia *et al.*, 2000-2004)

3.3 Análisis de los perímetros de incendios de los últimos 30 años y de las características fisiográficas y de vegetación de las zonas quemadas

El objetivo del análisis es mejorar el conocimiento que actualmente se tiene de las zonas quemadas y averiguar si existen patrones definidos en la probabilidad de que una zona se queme en función de su tipo de vegetación y su posición topográfica. A tal fin, el CREAM ha analizado los incendios forestales ocurridos en el periodo 1975-2003, de los cuales el DMAH ha facilitado los perímetros.

Las variables analizadas con el fin de estimar si un lugar se quema en función de su tipo de vegetación y su posición topográfica han sido:

- Vegetación afectada
- Orientación, pendiente y altitud
- Modelos de combustible y de inflamabilidad
- Carga total de vegetación (cantidad de combustible)

3.3.1 Vegetación afectada

En este punto, el objetivo es observar qué cubiertas vegetales son las que más a menudo se queman y si el patrón varía a lo largo del tiempo. Con el fin de estudiar la relación entre el tipo de vegetación y los incendios en el periodo mencionado, junto con la base de fuegos históricos (1975-2003) se han utilizado las siguientes capas gráficas:

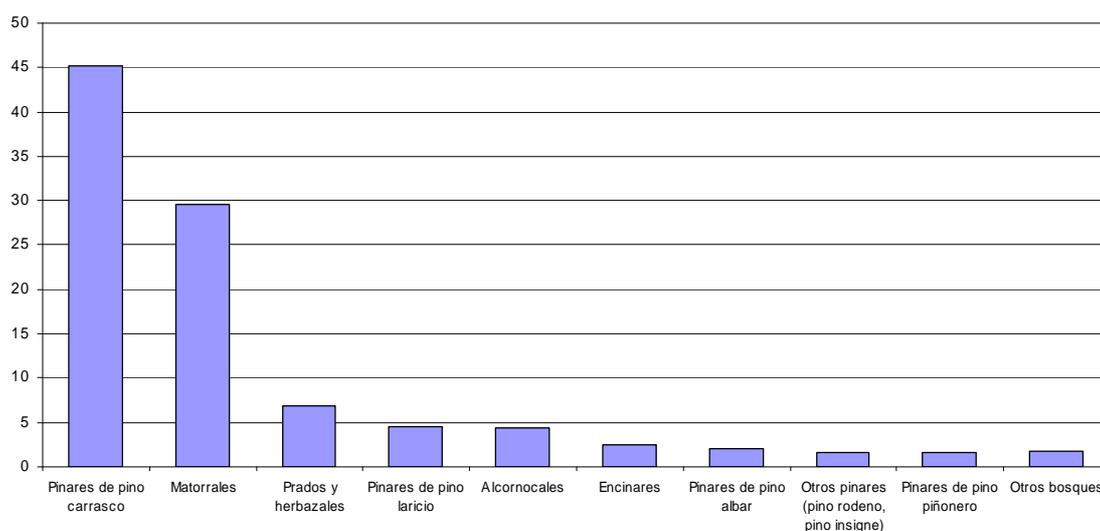


Figura 5. Formaciones vegetales quemadas (%) para el periodo 1975-1987, según el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos en Cataluña. Las formaciones vegetales que más incendios sufrieron fueron pinares de pino carrasco y matorrales.

Fuente: Elaboración propia.

- Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (MCA, MAPA, 1975; fuente: versión digital de la web del DMAH, 2004a): realizado a finales de los años 70 a escala 1:50 000, es la fuente más antigua de cartografía que abarque toda Cataluña en formato digital. El mapa documenta, entre otras cubiertas, los tipos de vegetación.

- Mapa Forestal de Cataluña (MFC, fuente: DMAH): hecho a finales de los años 80 y principios de los 90 a escala 1:100 000, tiene interés especial porque trata sobre todo de las cubiertas forestales. Se ha utilizado sobre todo para los incendios producidos a partir de 1988,

ya que el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos resulta excesivamente antiguo para estos incendios.

La distribución de la vegetación cambia con el tiempo y, en periodos de tiempos relativamente cortos como el que es de nuestro interés (1975-2003); uno de los principales factores que generan estos cambios son justamente los fuegos forestales. Por lo tanto, hay que utilizar el mayor número posible de mapas con el fin de recoger todos estos cambios. En el momento de empezar el presente trabajo, no había otra cartografía más o menos detallada de los tipos de vegetación para todo el territorio catalán, hecha dentro del periodo de tiempo considerado, que el MCA y el MFC. Por ello estos dos mapas se han utilizado para cubrir estos años, pero para periodos diferentes: el MCA desde 1975 hasta 1987 (figura 5), aproximadamente año frontera con el MFC, y el mismo MFC desde 1988 hasta el 2003 (figura 6). Ambos periodos difieren en las formaciones vegetales que más han quemado. Así, entre 1975 y 1987 los pinares de pino carrasco y los matorrales son los que más han quemado, mientras que entre 1988 y 2003 fueron matorrales y pinares de pino laricio.

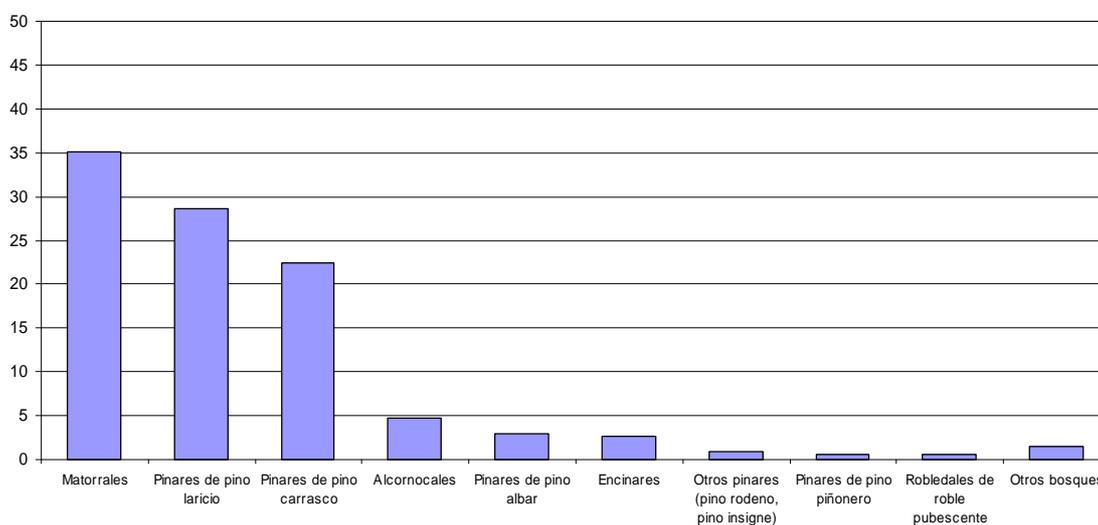


Figura 6. Formaciones vegetales quemadas (%) para el periodo 1988-2003, según el Mapa Forestal de Cataluña. Matorrales y pinares de pino negral fueron las formaciones más afectadas.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Orientación, pendiente y altitud

Se han valorado la exposición, la pendiente y la altitud, en relación a los fuegos históricos de los cuales se tiene el límite correspondiente. De esta manera, se puede ver si históricamente los incendios siguen algún patrón de distribución altitudinal, de pendiente o de orientación. Además de la base de fuegos históricos, se han utilizado las siguientes capas gráficas:

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): elaborado los años 1992-93 a partir del mapa topográfico 1:50 000 del ICC, es un ráster con píxel de 45 m que contiene las elevaciones en decímetros para toda Cataluña.

- Modelo Digital de Pendientes (MDP, fuente: CREAM): elaborado los años 1992-93 a partir del MDE anterior, es un ráster con píxel de 45 m que contiene las pendientes en porcentaje para toda Cataluña.

- Modelo Digital de Orientaciones (MDO, fuente: CREAM): elaborado los años 1992-93 a partir del MDE anterior, es un ráster con píxel de 45 m que contiene las orientaciones en grados para toda Cataluña.

Para ello, se ha procedido al cruce mediante el SIG-MiraMon entre capas gráficas: los perímetros de incendios con el MDE, MDP y MDO respectivamente. Se dispone de los estadísticos básicos (media, desviación estándar, etc.) de la distribución de cada una de las manchas de vegetación quemadas según orientación, pendiente y altitud, por año del periodo 1975-2003.

3.3.3 Modelos de combustible y de inflamabilidad

Las capas gráficas correspondientes a los modelos de combustible e inflamabilidad se han obtenido, para los bosques a partir de los modelos de combustible y modelos de inflamabilidad de las parcelas del IFN3, ajustados a los límites de la cubierta boscosa del Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña de 1993 (MCSC-1, fuente: CREAM, 2003; para más información, véase Ibáñez *et al.*, 2002), y para los matorrales mediante la Cartografía de Hábitats de Cataluña, ajustado también al MCSC-1, y aplicando los modelos por tipo de vegetación. Por lo tanto, estas capas equivalen en buena medida a los mapas de modelos de combustible e inflamabilidad de 1993. Por eso y para evitar confusiones con los incendios forestales recogidos al MCSC (1993), el periodo de incendios estudiado ha sido posterior a 1993 (figura 7).

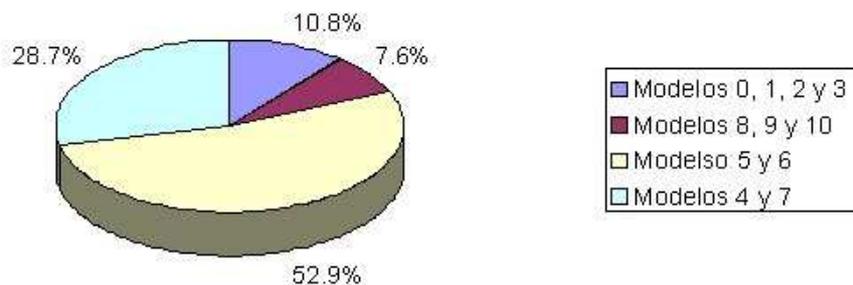


Figura 7. Distribución de los modelos de combustible de la vegetación en las zonas quemadas antes de incendio (1994-2003).

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Carga total de vegetación (biomasa o cantidad de combustible)

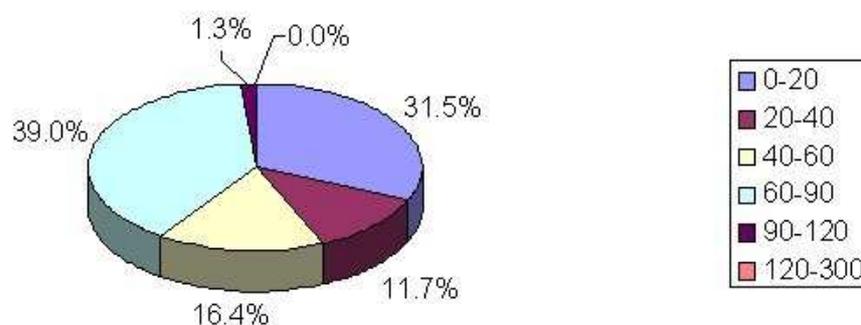


Figura 8. Distribución de las cargas totales de la vegetación en las zonas quemadas antes de incendio (1994-2003).

Fuente: Elaboración propia.

La capa gráfica correspondiente a las cargas totales se ha obtenido mediante la Cartografía de Hábitats de Cataluña, ajustada al MCSC-1, y aplicando los valores de cargas por tipo de vegetación de la Cartografía de Hábitats. Análogamente a los modelos de combustible y de inflamabilidad, esta capa equivale en buena medida al mapa de cargas totales de 1993. Así, el periodo de incendios estudiado ha sido posterior a 1993 (figura 8).

4. EL MAPA DE RIESGO: EL FUTURO

La mejora del mapa diario de riesgo de incendio también pretende abordar, y de hecho ya lo está haciendo, nuevos retos que supongan aportaciones relevantes para la valoración más ajustada y segura del riesgo. Son de destacar los siguientes aspectos en los que se está trabajando:

- Mapa de continuidad de las zonas forestales
- Mapa de radiación global diaria
- Tabla de asignación de peligro de incendio forestal
- Valoración de los resultados del mapa diario de riesgo de incendios forestales

4.1 Mapa de continuidad de las zonas forestales

La continuidad de las zonas forestales es un elemento importante en la propagación del fuego, puesto que cuánto más alta sea esta continuidad, potencialmente se puede quemar más área. Por eso hace falta incluir su medida en la confección del mapa de riesgo de incendio.

La información gráfica sobre la que medir la distancia corresponde a dos imágenes provenientes de la reclasificación del MCSC-1 y que producen los siguientes dos mapas:

- División de Cataluña en dos zonas, con y sin vegetación natural.
- División de Cataluña en dos zonas, con vegetación natural y cultivos, y sin ningún tipo de estas vegetaciones. Este segundo mapa sería adecuado para los meses en que los cultivos presentan un estado susceptible de quemarse.

En el presente trabajo, la continuidad se mide a partir de la distancia desde el interior de un polígono o mancha temáticamente homogénea a sus límites. En concreto, se toman 8 medidas, una cada 45°, desde el centro de cada uno de los píxeles de la mancha hasta el límite de ésta. Después, se calculan los siguientes estadísticos:

- Distancia media de un punto de una mancha a sus límites: La media o promedio es la suma de todos los valores medidos de distancia dividida entre el número total de datos de los cuales se dispone.
- Distancia máxima de las medidas desde un píxel a los límites de la mancha.
- Percentil 75 de las distancias: Es el valor de la medida de distancia que indica que un 75 % de los datos son menores o iguales que esta cifra, para un punto de la imagen.
- Mediana de las distancias: Es o el valor central o la media de los dos valores centrales del conjunto de distancias ordenadas en magnitud, para un píxel de la imagen.

Asimismo, estos cálculos se repiten en función de diferentes medidas de píxel, entendiéndose esta diferencia como los diversos grados de continuidad que puede tener la masa forestal de cara a los incendios según la época del año.

Todas estas medidas permiten la representación en mapa, de forma que se pueden incorporar al sistema de evaluación del riesgo de incendio.

4.2 Mapa de radiación global diaria

La radiación solar es una variable de interés ya que integra la información topográfica (pendiente, orientación y sombreado) que influye en la temperatura del aire y la precipitación, y además establece patrones en la formación de niebla, nubes y circulación local del viento, todos ellos elementos primordiales a la hora de establecer el riesgo de incendio.

Para obtener una buena estimación de la radiación solar incidente sobre Cataluña se ha utilizado el módulo Insoldia (para más información, véase Pons, 1996) del SIG-MiraMon (Pons, 2006) que, a diferencia de otros métodos de extrapolación de datos puntuales (radiación tomada en estaciones meteorológicas) como superficies de tendencia, *kriging*, etc., calcula directamente la radiación a partir de un modelo digital de elevaciones (de manera que se evita la falta de datos intermedios entre estaciones a una altitud y latitud similares pero separadas por un macizo o un valle), la constante solar o irradiancia exoatmosférica (1.367 W/m^2 , en el caso que nos ocupa y que corresponde a la irradiancia exoatmosférica en todo el espectro electromagnético; para un espectro determinado, por ejemplo el azul o el rojo, relacionados con la fotosíntesis, se pueden usar valores de 1957 y $1557 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ respectivamente) y la constante de extinción de la luz (en nuestro caso se usó $0,288$; un valor intermedio entre una atmósfera totalmente clara y una neblina densa). El programa calcula también la posición del sol en intervalos regulares definidos por el usuario (en nuestro caso, intervalos horarios), la distancia Tierra-Sol cada mes y las sombras proyectadas (ocultamientos topográficos) en cada punto (precisión en acimut: 10° , precisión en altura: 1°). El resultado son los trescientos sesenta y cinco mapas correspondientes a cada día del año de referencia correspondiente a 2003 donde cada celda ráster contiene el valor en $10\text{-kJ}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ de la radiación total (directa y difusa) en todo el espectro electromagnético sumada a lo largo del día.

4.3 Tabla de asignación de peligro de incendio forestal

En esta primera fase se ha propuesto un modelo aditivo que consta de diversas tablas de asignación. La base de partida es el índice meteorológico canadiense de peligro de incendio forestal al que se le van añadiendo y sustrayendo unidades en función de las diferentes informaciones disponibles. Este índice se compone de diferentes variables calculadas en función de los datos meteorológicos; algunos ejemplos son el *Buildup Index* o BUI, como expresión del contenido en humedad de la hojarasca, *Initial Spread Index* o ISI, es una valoración numérica de la tasa esperada de expansión de fuego.

El modelo consta de las siguientes tablas:

- Asignación básica de peligro en función del BUI del índice meteorológico canadiense
- Orografía que combina la orientación, altura y pendiente
- Meteorología horaria a las 6 de la mañana (hora solar) y tendencia respecto a las 6 de la mañana del día anterior
 - Lluvia reciente
 - Sequía profunda
 - Cargas de vegetación ponderadas por el ISI del índice canadiense
 - Modelos de inflamabilidad
 - Fenología anual.

4.4 Valoración de los resultados del mapa diario de riesgo de incendios forestales

El sistema elaborado para mejorar el mapa de riesgo de incendio tiene que evaluarse con la finalidad de captar su utilidad y eficacia, a la vez que proporcionar los puntos de partida para su mejora. El objetivo final es que las mejoras en el mapa de riesgo de incendio hechas a

partir de este sistema supongan un acierto alto del mapa. Este acierto se entiende como la relación que hay entre el grado de riesgo ante el fuego forestal, y lo que realmente tiene lugar.

Hasta el presente, se han comparado 50 mapas con la predicción de riesgo de incendio, elaborados con la metodología actual del SPIF, con los mismos mapas pero obtenidos mediante la metodología elaborada según el presente proyecto.

Las fechas de estos mapas van desde junio del 2003 hasta julio del 2005, en general separados entre ellos por 15 días.

Los mapas según la metodología actual del SPIF han sido entregados por el mismo Servicio, mientras que los mapas con la predicción según la metodología aquí propuesta se han obtenido a partir de las bases de datos también entregadas por el SPIF.

Los dos grupos de mapas se han estudiado con unos estadísticos descriptivos con el fin de evaluar con detalle la similitud de las predicciones según las metodologías actual y propuesta. Éstos estadísticos son los siguientes:

- Número de valores diferentes.
- Máximo de las diferencias entre los mapas originales y los mapas según la metodología propuesta cuando el valor de riesgo por celda de éstos últimos es superior al de los primeros.
- Máximo de las diferencias entre los mapas originales y los mapas según la metodología propuesta cuando el valor de riesgo por celda de los primeros es superior al de los últimos.
- Suma de las diferencias entre los mapas originales y los mapas según la metodología propuesta cuando el valor de riesgo por celda de éstos últimos es superior al de los primeros.
- Suma de las diferencias entre los mapas originales y los mapas según la metodología propuesta cuando el valor de riesgo por celda de los primeros es superior al de los últimos.

Por otra parte, se ha efectuado el análisis estadístico de la comparación de los dos grupos de mapas en base a los estadísticos siguientes:

- F de Fisher-Snedecor, para determinar si las variancias de los dos grupos de mapas son diferentes.
- t de Student, para determinar la probabilidad de que los dos grupos de mapas tengan la misma media. La t de Student aplicada ha sido para dos muestras con variancias diferentes (heteroscedásticas). En caso de que tuvieran la misma media, representaría que las dos metodologías obtendrían mapas similares, por lo cual el método propuesto podría adoptarse en las mismas condiciones con que se elabora diariamente el mapa de riesgo de incendio forestal.

BIBLIOGRAFÍA

- Canadian Forestry Service (1987). *Canadian Forest Fire Danger Rating System – Users' Guide*. Canadian Forestry Service Fire Danger Group.
- Carrega, P. (1991): A meteorological index of forest FIRE hazard in Mediterranean France. *International Journal of Wildland Fire*. 1(1): 79-86.
- CREAF (2003): "Mapa de cubiertas del suelo de Cataluña". Disponible en: <http://creaf.uab.cat/mcsc>. Visitado en Mayo 2006.
- DMAH (2004a): "Mapa de cultivos y aprovechamientos". Disponible en: <http://mediambient.gencat.net>. Visitado en Mayo 2006.

- DMAH (2004b): "Cartografia dels Hàbitat de Catalunya". Disponible en: <http://mediambient.gencat.net>. Visitado en Mayo 2006.
- Gracia, C.; Burriel, J.A.; Mata, T.; Ibàñez, J.J.; y Vayreda, J (2000-2004). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals*. Bellaterra, CREA. ISBN de la serie: 84-931323-0-6.
- Ibàñez, J.J.; Burriel J.A.; y Pons, X. (2002). El mapa de cobertes del sòl de Catalunya: una eina per al coneixement, la planificació i la gestió del territori. *Perspectives Territorials*. 3: 10-25. Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya.
- Ibàñez, J.J., Vayreda, J. y Mata, T. (2005). *Indicadores ecológicos en el marco del tercer inventario forestal nacional. Barcelona. Cataluña*. Madrid, D. G. para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente.
- MAPA (1975). "Mapa de cultivos y aprovechamientos". Madrid.
- MAPA (1989). *Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible*. Madrid, ICONA.
- Marull, J.; Pino, J.; Carreras, J.; Ferré, A.; Cordobilla, M.J.; Llinàs, J.; Rodà, F.; Carrillo, E. y Ninot, J.M. (2004). *Primera proposta d'índex del valor del patrimoni natural de Catalunya (IVPN), una eina cartogràfica per a l'avaluació ambiental estratègica*. Butlletí de la Institució d'Història Natural, 72: 115-138.
- Mata T.; Ibàñez J.J.; Vayreda J.; Burriel J.A.; y Gracia C. (2005) Mapas de modelos de combustible y de modelos de inflamabilidad: Herramientas para la sostenibilidad. *Libro de resúmenes, conferencias y ponencias del IV Congreso Forestal Español*, edición en CD-ROM, artículo 640. Zaragoza.
- Montserrat, D. (2000). "Mapas sinópticos medios correspondientes al inicio de grandes incendios forestales en Catalunya", en Raso, J.M. y Martín-Vide, J. (Eds.): *La Climatología española en los albores del siglo XXI*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, nº1, pp. 289-296.
- Montserrat, D. (2001). "Meteorogramas sinópticos medios relacionados con el inicio de grandes incendios forestales en Catalunya", en: Pérez-Cueva, A.J., López Baeza, E. y Tamayo Carmona, J. (Eds.): *El tiempo del Clima*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, nº2, 389-399.
- NOAA National Operational Model Archive & Distribution System (2005). Disponible en: <http://nomads6.ncdc.noaa.gov>. Visitado en Mayo 2006.
- Pla, E. (2002). *Modelització de la dinàmica de combustible en ecosistemes arbustius mediterranis*. Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Tesis doctoral inédita.
- Pons, X. (1996). "Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica", en Juaristi, J. y Moro, I. (eds.): *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Vitoria-Gasteiz.
- Pons, X. (2006): *MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing software*. Bellaterra, CREA. ISBN: 84-931323-5-7.
- Rothermel, R. C. (1983). *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. Odgen, EE.UU. U.S. Forest Service.
- Vigo, J.; Carreras, J; y Ferré, A. (2005): *Manual dels habitats de Catalunya, volum I*. Barcelona, Departament de Medi Ambient i Habitatge. ISBN: 84-393-6982-4.