

# BOLETÍN DE LA ASOCIACIÓN DE GEÓGRAFOS ESPAÑOLES

## CONSEJO ASESOR / ASSESSMENT BOARD

Anthony Bebbington. University of Manchester  
Vincent Berdoulay. Domaine Universitaire. Université de Pau  
Georges Bertrand. Université de Toulouse II  
Joaquín Bosque Sendra. Universidad de Alcalá de Henares  
Jean-Paul Bravard. Université Lumière Lyon 2  
Toni Breuer. Universität Regensburg  
Anne Buttner. University of Cork  
Ángel Cabo Alonso. Universidad de Salamanca  
Emmanuel Eveno. Université du Toulouse - Le Miral  
María Luisa Frutos Mejías. Universidad de Zaragoza  
María Dolores García Ramón. Universitat Autònoma de Barcelona  
José María García Ruiz. Instituto Pirenaico de Ecología  
Josefina Gómez Mendoza. Universidad Autónoma de Madrid  
Costis Hadjimichalis. Harokopio University, Athens (Grecia)  
Rodrigo Hidalgo. Universidad Católica de Chile  
Peter Jackson. Sheffield University (England)  
Maria João Alcoforado. Universidade de Lisboa  
Aharon Kellerman. Universidad de Haifa  
Juan Luis Klein. Université du Québec  
Antonio López Ontiveros. Universidad de Córdoba  
Eduardo Martínez de Pisón Stampá. Universidad Autónoma de Madrid  
Juan Mateu Bellés. Universitat de València  
Carlos de Mattos. Universidad Católica de Chile  
Ricardo Méndez Gutiérrez del Valle. Instituto de Economía y Geografía. CSIC  
Fernando Molinero Hernando. Universidad de Valladolid  
Janet Henshall Momsen. University of California Davis (EEUU)  
Janice Monk. Tucson University (EEUU)  
Carmen Ocaña Ocaña. Universidad de Málaga  
José Omar Moncada. UNAM, Mexico  
José Luis Palacios. Universidad Autónoma de México  
Fernando Rebelo. Universidade de Coimbra  
Paolo Rodrigues. Universidade de Rio Grande. Brasil  
Andrés Rodríguez Pose. London School of Economics  
Hugo Romero. Universidad de Chile  
Juan Romero González. Universitat de València  
Fabio Sforzi. Università di Torino  
Dina Vaiou, National Technical University of Athens (Grecia)  
Mario Vale. Universidade de Lisboa  
Dan van der Horst. University of Birmingham  
J. Fernando Vera Rebollo. Universidad de Alicante  
Rainer Wehrhann. Universidad de Kiel (Alemania)  
Florencio Zoido Naranjo. Universidad de Sevilla

## CONSEJO DE REDACCIÓN / EDITORIAL BOARD

Salvador Antón Clavé. Universitat de Tarragona  
Eugenio Baraja Rodríguez. Universidad de Valladolid  
Dolores Brandis García. Universidad Complutense de Madrid  
Josefa Bru Bisutier. Universitat de Girona  
Inmaculada Caravaca Barroso. Universidad de Sevilla  
Carmelo Conesa García. Universidad de Murcia  
Emilio Chuvieco Salinero. Universidad de Alcalá de Henares  
Carmen Delgado Viñas. Universidad de Cantabria  
Pedro Dorta Antequera. Universidad de La Laguna  
Ana Isabel Escalona Orcao. Universidad de Zaragoza  
Cayetano Espejo Marín. Universidad de Murcia  
Felipe Fernández García. Universidad de Oviedo  
M<sup>o</sup> Rosario Galdós Urrutia. Universidad del País Vasco  
Jacobo García Álvarez. Universidad Carlos III de Madrid  
Arlinda García Coll. Universitat de Barcelona  
M<sup>o</sup> Luisa Gómez Moreno. Universidad de Málaga  
Ruben C. Lois González. Universidade de Santiago de Compostela  
Javier Gutiérrez Puebla. Universidad Complutense de Madrid  
Javier Martín Vide. Universitat de Barcelona  
Antonio Moreno Jiménez. Universidad Autónoma de Madrid  
Alfonso Mulero Mendigorri. Universidad de Córdoba  
José Ojeda Zújar. Universidad de Sevilla  
David Palacios Estremera. Universidad Complutense de Madrid  
M<sup>o</sup> Jesús Perles Roselló. Universidad de Málaga  
M<sup>o</sup> Fernanda Pita López. Universidad de Sevilla  
Juan Ignacio Plaza Gutiérrez. Universidad de Salamanca  
Onofre Rullán Salamanca. Universitat de les Illes Balears  
Julia Salom Carrasco. Universitat de València  
Miguel Sánchez Fabre. Universidad de Zaragoza  
Concepción Sanz Herráiz. Universidad Autónoma de Madrid  
David Sauri Pujol. Universitat Autònoma de Barcelona  
Joana María Seguí Pons. Universitat de les Illes Balears

## CONSEJO DE EDICIÓN / EDITION BOARD

Gemma Canoves Valiente. Universitat Autònoma de Barcelona  
José María Ferial Toribio. Universidad Pablo de Olavide (Sevilla)  
Inmaculada Caravaca Barroso. Universidad de Sevilla  
Juan Ignacio Plaza Gutiérrez. Universidad de Salamanca

## SECRETARÍA DE REDACCIÓN / JOURNAL EDITORIAL SECRETARY

Jorge Olcina Cantos. Universidad de Alicante

*Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (ISSN 0212-9426) es una revista con periodicidad cuatrimestral editada y distribuida por la Asociación de Geógrafos Españoles, a través de su Secretaría, cuya dirección es C/ Pinar 25, 28006 Madrid.

Es objetivo de esta publicación posibilitar la difusión de las investigaciones realizadas por el colectivo de geógrafos españoles, a la vez que constituye un foro de debate abierto a todas las personas interesadas en la ciencia geográfica. Está dirigida a investigadores, docentes, profesionales de la geografía y estudiantes desde una perspectiva abierta, asimismo, al resto de disciplinas de las ciencias sociales y naturales. Permite integrar experiencias, conocimientos sobre líneas de investigación y metodologías de trabajo desarrolladas en el seno de la Geografía, en sus distintas ramas de especialización. Es un medio para la publicación de reflexiones sobre procesos territoriales, medioambientales y socioeconómicos que atañen directamente a la valoración de los entornos y facilitan el conocimiento de la realidad para afrontar retos en las relaciones entre grupos sociales y el territorio.

Cada número de la publicación se estructura a partir de aportaciones en forma de artículos, basados en estudios originales, junto con notas de síntesis y reseñas de libros y tesis doctorales que permiten al lector un conocimiento sobre tendencias y evolución de la disciplina geográfica.

Los trabajos presentados son sometidos a evaluación externa y anónima, por parte de miembros de la comunidad geográfica nacional e internacional, con participación los Consejos de Redacción y Asesor.

La revista *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* aparece indexada en las siguientes bases de datos: ISOC (CINDOC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas), LATINDEX, URBADISC y Bibliographie Géographique Internationale. A través de los portales de difusión electrónica de revistas TECNOCIENCIA ([www.erevistas.csic.es](http://www.erevistas.csic.es)) y DIALNET (<http://dialnet.unirioja.es/>) se pueden consultar los contenidos de la revista en formato \*pdf, e igualmente en la propia página web de la Asociación de Geógrafos Españoles ([www.age.es](http://www.age.es) y <http://www.ieg.csic.es/age/boletin.htm>). El Boletín de la Asociación de Geógrafos ha sido incluido, desde 2005, en el Social Science Citation Index (SSCI) y aparece citado en el listado de revistas indexadas que se contiene en la página web de Thompson Scientific (<http://www.isinet.com/>).

e-revist@S

THOMSON

Copyright 1984. Todos los derechos reservados. Ninguna parte de los estudios editados puede ser reproducida a través de cualquier medio técnico sin permiso escrito del editor.

Las opiniones expresadas en artículos, notas, informaciones, reseñas de libros y resúmenes de tesis publicadas por el *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* son de exclusiva responsabilidad de sus autores.

La Asociación de Geógrafos Españoles, a los efectos previstos en el artículo 32.1, párrafo segundo del vigente TRLPI, se opone expresamente a que cualquier de las páginas del Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, o partes de ellas, sean utilizadas para la realización de resúmenes de prensa.

Cualquier acto de explotación (reproducción, distribución, comunicación pública, puesta a disposición, etc.) de la totalidad o parte de las páginas del Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, precisará de la oportuna autorización, que será concedida por CEDRO mediante licencia dentro de los límites establecidos en ella.



---

# **ARTÍCULOS**

---



# EMPLEO DE TÉCNICAS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS DE RIESGO HUMANO DE INCENDIO FORESTAL A ESCALA REGIONAL

**Lara Vilar del Hoyo, M<sup>a</sup> Pilar Martín Isabel y Javier Martínez Vega**  
Instituto de Economía y Geografía (IEG). Centro de Ciencias Humanas y Sociales. CSIC

## RESUMEN

Se aborda la realización de modelos de riesgo humano de incendio forestal mediante el empleo de técnicas de regresión logística, estimando la probabilidad de ocurrencia del fenómeno a partir de variables de tipo socio-económico relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales en las Comunidades Autónomas de Madrid y Valencia. Las variables independientes de riesgo se generan a partir de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), a una resolución de 1 km<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** incendio forestal, Regresión Logística, riesgo humano.

## ABSTRACT

*Application of Logistic Regression techniques to obtain human wildfire risk models at regional scale*

The objective of this work is to develop human wildfire risk models using Logistic Regression techniques, estimating the probability of occurrence from socioeconomic explanatory variables in the regions of Madrid and Valencia. The explanatory variables are generated thanks to GIS at 1 km<sup>2</sup> grid level.

**Key words:** Forest fire, Logistic Regression, human wildfire risk.

---

Fecha de recepción: noviembre 2007.

Fecha de aceptación: agosto 2008.

## I. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales pueden definirse como el fuego que se propaga, sin control, en un sistema forestal y cuya quema no cumple funciones ni objetivos de gestión, por lo que requiere trabajos de extinción. Es un suceso no deseado en el que se producen una serie de consecuencias económicas y ecológicas calificadas como daños y perjuicios (Salas y Cocero 2004 citando a Martínez, 2001). La incidencia de este fenómeno en nuestro país se relaciona con las características climatológicas propias de la región mediterránea, pero también con la acción del hombre, ya que, según las estadísticas oficiales el 96,1 % de los incendios que ocurren en España obedecen a causas humanas (DGB, 2006).

El fuego es un elemento propio de los ecosistemas mediterráneos, con efectos incluso positivos en un ciclo de recurrencia suficientemente largo. De hecho, buena parte de estos ecosistemas sólo se explican por una presencia recurrente del fuego (Martínez *et al*, 2004 citando a Moreno, 1989). Sin embargo, este equilibrio se ha roto en las últimas décadas al acortarse los ciclos de recurrencia (Martínez *et al*, 2004 citando a Vélez, 1986). Las transformaciones socio-económicas guardan estrecha relación con este fenómeno. Así, por ejemplo, diversos autores señalan que el problema de los incendios es mucho menor en la ribera Sur de los países del Mediterráneo, a pesar de que su clima es similar o incluso más severo que el de los países mediterráneos del Sur de Europa y la vegetación no es muy distinta, por lo que estiman que las diferencias se deben fundamentalmente a las condiciones socioeconómicas (Estirado y Molina, 2005). Según Vélez (2005), los factores condicionantes de esta situación en el conjunto de los países del arco norte del Mediterráneo son ecológicos (grandes períodos de sequía con alta inflamabilidad de la vegetación), económicos (baja renta del sector forestal), demográficos (éxodo rural) y políticos (atención de lo *urgente* –extinción– y no de lo *importante* –prevención–).

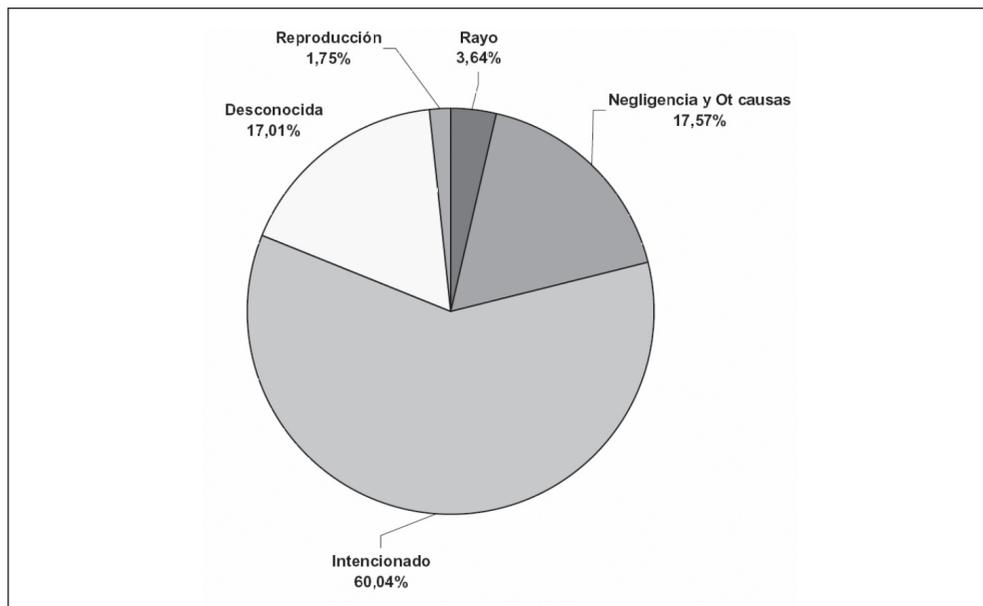
Actualmente se está asistiendo, en el entorno europeo, a cambios socioeconómicos, culturales y políticos que han dado lugar a importantes transformaciones económico-productivas y socioculturales en el mundo rural (Moyano, 2006). La superficie forestal española ha aumentado un 6% desde el período 1986-1995 (Segundo Inventario Forestal Nacional) al período 1997-2000 (Tercer Inventario Forestal Nacional), ocupando un 52% del territorio (MAPA, 2004). A pesar de este alto porcentaje, la contribución al PIB del sector forestal es tan sólo del 0,15% (Vélez, 2005). Por otro lado, se está produciendo una “urbanización de lo rural”, con una difusión de la ciudad hacia el territorio rural por medio de la urbanización, ampliándose la interfaz urbano-forestal. Igualmente se produce el desarrollo de nuevas actividades y usos en las zonas forestales, tales como el recreativo (Izquierdo, 2006). Estos cambios dan lugar a diversos problemas ecológicos. En el caso de los incendios forestales, buena parte de estos cambios han tenido como efecto inmediato un aumento del riesgo de incendios, además de crear las condiciones idóneas para su propagación (Martínez, 2004).

En las dos últimas décadas se han mejorado los recursos de extinción realizándose grandes inversiones y obtenido resultados aparentemente aceptables. Sin embargo, el problema de los incendios sigue e incluso se agrava. Según muestran las estadísticas, la tendencia en el número de incendios es creciente (Estirado y Molina, 2005). Resulta, por tanto, necesario dar un nuevo enfoque para mejorar las estrategias de gestión potenciando especialmente las labores de prevención.

Para poder llevar a cabo unas adecuadas labores de prevención es necesario conocer las causas de los incendios forestales. Estas se pueden dividir en dos grupos: estructurales si no inician el incendio pero incrementan el riesgo de que se produzca, e inmediatas si provocan el inicio del incendio (INFOCA, 2006). Como se ha citado anteriormente, las estadísticas de incendio forestal que se recogen en España desde 1968 (Base de Datos de Incendios Forestales- BDIF), muestran que el factor humano explica más de un 90% de los incendios que se producen en nuestro territorio. Los Partes de Incendio constituyen actualmente una valiosa fuente de información para la interpretación del fenómeno de los incendios en España. Estos partes se han ido modificando, enriqueciéndose y adecuándose a las necesidades marcadas por la evolución del fenómeno de los incendios y de los medios de detección y extinción disponibles (Martínez, 2004). Por lo que respecta a la causalidad, el modelo actual de Parte recoge información sobre los siguientes grupos de causa de incendio: rayo, negligencias, intencionado, desconocido, reproducido y otras causas. Asimismo, para los incendios de tipo intencionado se registra el tipo de motivación, entre los que se encuentran, por ejemplo, incendios provocados por agricultores, ganaderos, pirómanos, etc. De igual forma también se recoge información sobre el lugar de inicio del incendio (junto a caminos, pistas, vías férreas, entre otros).

En la Figura 1 se muestra la distribución de causas en el conjunto de España en el período 1996-2005 según datos de la DGB (2007). Como se puede observar, el porcentaje más alto corresponde a los incendios intencionados (60,04%). Las motivaciones de estos incendios

Figura 1  
DISTRIBUCIÓN DE CAUSAS DE INCENDIO FORESTAL (%) EN ESPAÑA. 1996-2005

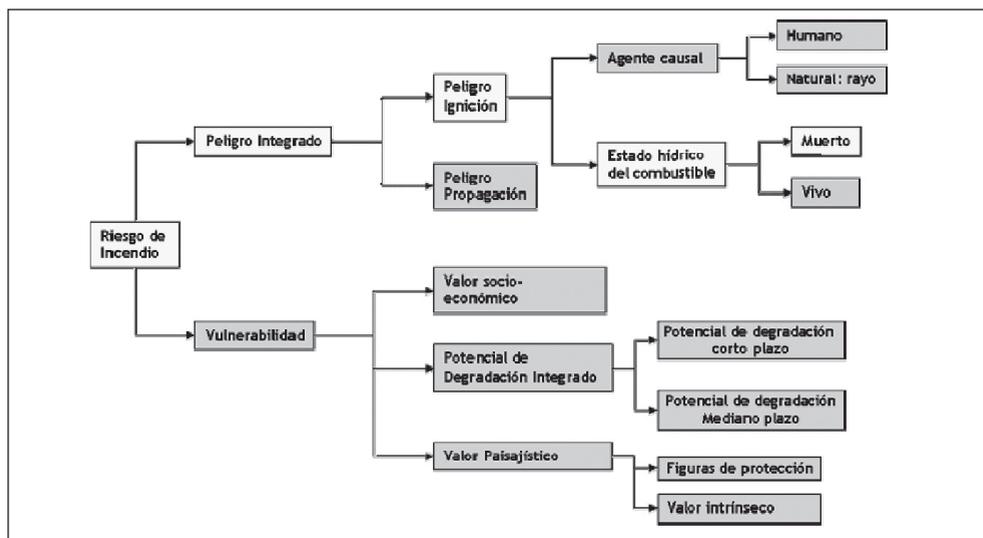


Fuente: Los Incendios Forestales en España. Decenio 1996-2005. Área de Defensa Contra Incendios Forestales de la Dirección General para la Biodiversidad.

intencionados se desconocen en más de un 50%. De los que sí se tiene un conocimiento cierto de su origen, son las quemas agrícolas ilegales y abandonadas (42,96%) y las quemas para la regeneración de pastos (30,86%) los que ocupan los primeros lugares. Las negligencias son la segunda causa en importancia (17,57%). En cuanto a los incendios causados por rayo (la única causa natural de incendio en nuestro país) no alcanzan el 4%.

Resulta evidente, dada la importancia de las consecuencias de los incendios forestales a todos los niveles (ecológico, económico, social), el interés de contar con mecanismos para el establecimiento de acciones permanentes y eficaces de prevención. Con este objetivo se aborda el estudio del riesgo de incendio. De entre los diversos planteamientos conceptuales del riesgo se encuentra el que estructura el mismo en tres componentes relacionados con el inicio de fuego, la propagación y los daños que produce en el medio (Chuvieco *et al*, 2004). Este planteamiento es objeto de estudio en el marco del Proyecto *Firemap*: “Análisis Integrado de Incendios Forestales mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica” (CGL2004-06049-C04-02/CLI)<sup>1</sup>. En este proyecto se propone un esquema de integración de las variables relacionadas con el riesgo de ignición, propagación y la vulnerabilidad (Figura 2). En este esquema se plantea la necesidad de obtener un índice de causalidad a partir del análisis de los factores humanos y naturales (rayo) que pueden desencadenar el inicio del fuego. Es precisamente en el estudio de los aspectos relacionados con la causalidad humana en el que se centra el presente trabajo.

Figura 2  
ESQUEMA DE OBTENCIÓN DEL RIESGO INTEGRADO DE INCENDIO FORESTAL



Fuente: Proyecto Firemap  
<http://www.geogra.uah.es/firemap>

<sup>1</sup> Proyecto financiado por la CICYT (diciembre 2004 - diciembre 2007). Entidades participantes: Universidad de Alcalá, Universidad de Córdoba, IEG-CSIC, INM, Universidad Castilla la Mancha, Universidad Politécnica de Madrid, CEAM, Universidad de Zaragoza.

El componente humano del riesgo de incendio es difícil de modelar, debido, principalmente, a las dificultades para cuantificar y espacializar determinadas particularidades del comportamiento humano. No obstante, se pueden realizar aproximaciones interesantes a partir del análisis de ciertas variables o indicadores que nos permitan representar los factores de tipo socioeconómico que pueden influir directa o indirectamente en la ocurrencia de incendios. Algunos autores clasifican estos factores según el siguiente esquema (Leone *et al*, 2003):

- Factores relacionados con transformaciones socioeconómicas (abandono de actividades tradicionales, cambios demográficos, urbanización, nuevas actividades recreativas)
- Factores relacionados con actividades tradicionales en áreas rurales (población rural envejecida, quemas agrícolas y ganaderas)
- Factores que pueden causar incendios por accidente o negligencia (líneas eléctricas, vías de comunicación)
- Factores de disuasión frente a la ignición (recursos de extinción, medios de vigilancia)
- Factores que generan conflictos y que pueden desembocar en el inicio intencionado de incendios o facilitar su propagación (cambios de uso, declaración de zonas protegidas, conflictos en la propiedad forestal, venganzas contra la administración, “industria del fuego”)

A partir de estos factores y de cara a generar un modelo espacializado del riesgo, es preciso obtener variables de tipo cartográfico o estadístico que permitan su representación. El manejo de toda esta información es posible gracias al empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Son numerosos los estudios de riesgo de incendio que emplean el SIG para la integración espacial de variables, teniendo en cuenta las relaciones geográficas y analíticas entre los datos. Entre estos se encuentran los llevados a cabo por Chuvieco y Salas (1994 y 1996), Castro y Chuvieco (1998), Gouma y Chronopoulou-Sereli (1998), Pew y Larsen (2001), Cardille *et al* (2001), entre otros. Estos trabajos tratan de generar modelos explicativos y fundamentalmente predictivos que permitan estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales a partir del análisis de un conjunto de variables. La probabilidad de ocurrencia de un incendio varía en el tiempo y en el espacio dependiendo de distintos factores de riesgo. Por este motivo los primeros modelos de riesgo humano se basaban en las distribuciones binomial y de poisson, aptas para sucesos raros. Posteriormente, se profundiza en los factores de riesgo y en la explicación de la probabilidad de existencia del incendio mediante técnicas de regresión, principalmente regresión logística (Lorenzo y Pérez, 1995). Esta técnica permite describir las relaciones entre una variable dependiente nominal u ordinal y un conjunto de variables independientes continuas o categóricas, así como cuantificar las relaciones y clasificar. Diversos autores han empleado esta técnica para la obtención de modelos predictivos de ignición de incendio a escala regional, Chuvieco *et al* (1999) y Martínez *et al* (2004); local, Perestrello de Vasconcelos *et al* (2001), Vega-García *et al* (1995), Lin (1999) (en Martín *et al*. 2002), Pew *et al* (2001). Otros estudios utilizan esta

técnica para la predicción de la ocurrencia diaria: Martell *et al* (1985, 1987); Loftsgaarden y Andrews (1992) (en Martín *et al.* 2002); Vega-García *et al* (1995).

## II. OBJETIVOS

El presente trabajo persigue la obtención de modelos predictivos de riesgo de incendios forestales a partir de variables de tipo socio-económico, profundizando en el conocimiento de las relaciones entre factores humanos y la ocurrencia de incendios. Se propone el empleo de técnicas de Regresión Logística para generar modelos predictivos espacializados a una resolución de 1 km<sup>2</sup> en las Comunidades Autónomas de Madrid y Valencia<sup>2</sup>. El propósito es desarrollar modelos consistentes y espacialmente extrapolables que puedan integrarse con facilidad en un sistema de riesgo más complejo que incluya otros factores (vegetación, clima, etc.) relacionados con la ocurrencia de incendios forestales.

Para alcanzar este objetivo general se abordarán los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y generar variables independientes que representen los diversos factores de riesgo de incendio vinculados a la actividad humana.
- Definir y generar la variable dependiente en el modelo: ocurrencia de incendios de causa humana.
- Proponer y aplicar los análisis estadísticos previos a la generación del modelo para la selección de las variables independientes a incluir en el mismo.
- Proponer, generar y validar el modelo de regresión logística binaria.

En este trabajo, el riesgo humano de ignición va a considerarse como un componente estructural, para una estimación del riesgo a largo plazo. La componente temporal del riesgo vendría matizada temporalmente por la variación de los factores del medio físico (rayos y humedad del combustible) en el modelo de riesgo integrado (Figura 2).

## III. MATERIAL Y MÉTODOS

### 1. Áreas de estudio

Los modelos de riesgo de incendio debidos a causa humana han sido elaborados para la C. Madrid y la C. Valenciana (Figura 3). El período de estudio comprende los años 1990 a 2004. Se ha elegido este período para asegurar la consistencia de los datos de incendios utilizados y para garantizar la robustez de los análisis estadísticos efectuados.

---

<sup>2</sup> La elección de esta unidad de análisis se basa en la demanda que los gestores vienen realizando para trabajar a un nivel local de riesgo.

Figura 3  
ÁREAS DE ESTUDIO.



España. Límites Comunidades Autónomas y áreas objeto de estudio.

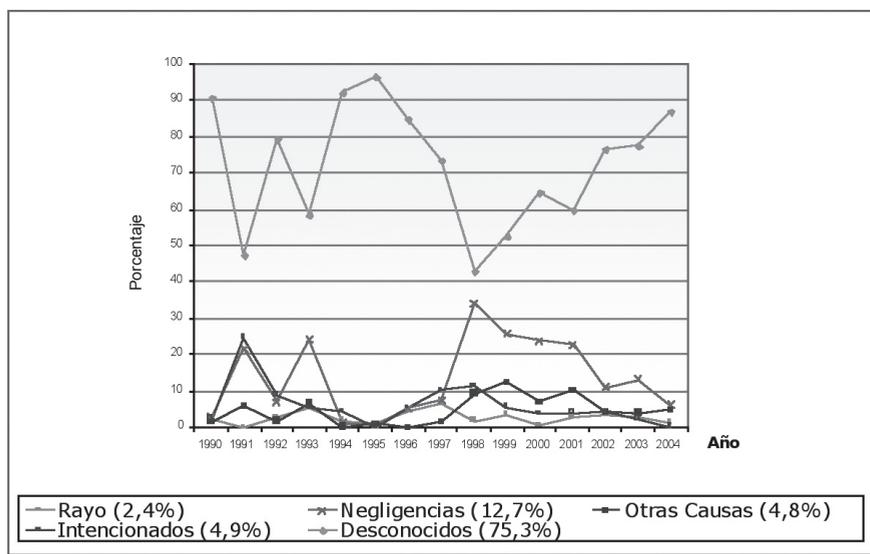
#### A) Comunidad de Madrid

La C. Madrid, con tan solo 8.027,9 km<sup>2</sup> (1,6 % de la superficie nacional), cuenta con una población de, aproximadamente, 6 millones de habitantes (Julio de 2007) (14% de la población total de nuestro país) distribuida en 179 municipios de características muy diversas. Se trata de la región más densamente poblada de España con unos 748 habitantes/km<sup>2</sup>. En las últimas décadas las áreas urbanas han experimentado un notable crecimiento en la región ocupando, primero, las áreas agrícolas vecinas y, después, las zonas forestales más distantes. La eficiente red de transportes de la región (más de 3.000 km de carreteras y aproximadamente 300 km de líneas de ferrocarril) ha contribuido a este proceso al facilitar la movilidad de la población entre zonas urbanas y peri-urbanas. Este hecho, unido al cambio en los modelos residenciales (predilección por zonas compuestas por agrupaciones de viviendas de baja densidad: casas, *chalets*), ha favorecido el crecimiento de áreas residenciales en zonas forestales tanto para uso recreativo (segunda residencia) como para vivienda habitual. Este modelo de urbanización ha dado lugar a que el contacto entre las áreas urbanas y las forestales (interfaz urbano-forestal) adquiera una gran importancia en la región y se convierta en una de las principales preocupaciones de los gestores contra incendios dado el alto riesgo al tiempo que eleva la vulnerabilidad que estas zonas presentan frente a este fenómeno (Leone et al., 2003 citando a Vélez). A pesar de su alto grado de urbanización la C. de Madrid cuenta con un gran número de espacios naturales preservados bajo diversas figuras de protección derivadas de la legislación estatal, autonómica y comunitaria (Parques naturales, regionales,

ZEPAs, LICs, etc.). Estas zonas protegidas suponen aproximadamente el 13% del territorio regional (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Madrid) y son especialmente vulnerables al fenómeno de los incendios por la riqueza de ecosistemas, hábitat y especies vegetales y animales que albergan y también por el valor paisajístico y de uso recreativo que poseen.

En la C. de Madrid, la media de incendios por cada 10.000 ha de superficie forestal para el período 1991-2005 es de 6,7, siendo la media nacional 7,5 (WWF/ADENA, 2007). Las características especiales de alta densidad de población y uso recreativo de sus masas forestales la convierten en un área de especial interés para el estudio. En la Figura 4 se observa la distribución y evolución temporal de las principales causas de incendios en la región desde 1990 a 2004. Destaca el alto porcentaje de causas desconocidas y la notable proporción de incendios por negligencia.

Figura 4  
TENDENCIAS DE INCENDIOS FORESTALES SEGÚN TIPO DE CAUSA. C. MADRID. PERÍODO 1990-2004



Fuente: Elaboración propia a partir Partes de Incendio DGB 1990-2004.

Si se desglosan los incendios por estaciones del año y según la tipología detallada de causas, sin incluir los desconocidos, en primavera y otoño son los trabajos forestales la causa mayoritaria de incendios, mientras que en invierno es la quema de pastos y en verano los incendios intencionados.

## B) Comunidad Valenciana

La Comunidad Valenciana, con una extensión de 23.255 km<sup>2</sup> (4,6% del total nacional), es la séptima comunidad española en superficie. Es un territorio especialmente castigado por

los incendios forestales debido a sus características climáticas de extremo riesgo, su marcada orografía y la presión humana.

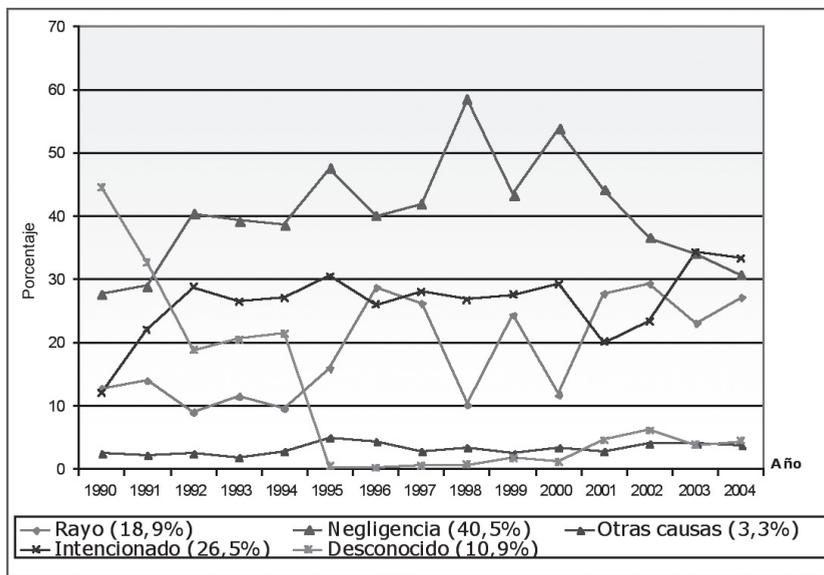
El clima de esta región es típicamente mediterráneo con una marcada sequía estival y un máximo pluviométrico otoñal. Climatológicamente existe en esta región un factor de capital importancia a efectos de la incidencia de incendios: los vientos terrales (ponientes). Si bien durante la época de peligro, coincidente con el verano, el régimen climatológico general es el establecido por los vientos de Levante o las brisas costeras que provocan una elevada humedad relativa del aire (50-70%) y vientos moderados; en determinadas ocasiones, la penetración por el oeste de frentes procedentes del Atlántico produce una situación bien diferente. En este caso llegan al este de la Península Ibérica masas de aire totalmente desprovistas de humedad y con temperaturas muy elevadas, debido a efecto Foehn, que favorecen el inicio y la propagación de incendios (Ferrando, 2004).

La vegetación dominante en la región es típica de un ambiente mediterráneo. Se trata de una vegetación esclerófila cuya especie dominante es la encina con el roble y el alcornoque aunque también encontramos otras especies como el pino, que en la actualidad ocupa una importante superficie en la región debido a una intensa labor de repoblación que fue especialmente frecuente en las zonas afectadas por incendios. El matorral, de carácter termófilo, se debe a causas climáticas principalmente, pero también a la acción antrópica que favoreció áreas despejadas para la alimentación del ganado y a la frecuente ocurrencia de incendios. La reiteración de los grandes incendios en los últimos 20 años ha supuesto la disminución de las comunidades arboladas, sobre todo pinares, y un aumento de las comunidades dominadas por especies arbustivas de ciclo más corto y de elevada inflamabilidad (aulaga, romero, jaras). Los suelos han sufrido estas perturbaciones, presentando en algunas zonas riesgos altos de erosión y empobrecimiento (Ferrando, 2004).

La C. Valenciana tiene un total de 4.824.568 habitantes (Julio de 2007). La densidad de población en la provincia de Alicante es de 298 habitantes/km<sup>2</sup>, en Valencia 224 habitantes/km<sup>2</sup> y en Castellón 82 habitantes/km<sup>2</sup> (INE, 2005). La población ocupada se dedica fundamentalmente al sector servicios (el 60,4% en 2001), trabajando el resto en la agricultura (4,1%), la construcción (11,4%) e industria (24,1%) (Plan General de Ordenación Forestal, 2004). La sociedad valenciana presenta un gran arraigo en el uso del fuego, y no tanto en actividades lúdicas, sino como herramienta tradicional de eliminación de residuos agrícolas (Suárez, 2000). El sector turístico juega un importante papel en la economía de este área de estudio, siendo visitada cada año sobre todo en la época estival por un gran número de turistas. En valores absolutos, en 2006, la región recibió a un total de unos 5 millones y medio de personas, frente a los 58 millones que recibió el conjunto de España (9% del total nacional aprox.) (INE, 2007).

La media de incendios por cada 10.000 ha de superficie forestal del período 1991-2005 en la C. Valenciana es de 4,6, menor que la media nacional 7,5 (WWF/ADENA, 2007). Las causas de incendio forestal en el período 1990-2004 se recogen en la Figura 5. Las causas más frecuentes son las negligencias, seguidos de los incendios intencionados y los producidos por rayo. Destaca el bajo porcentaje de incendios desconocidos (10,9%), el cual ha ido disminuyendo hasta ser inferior al 10% desde el año 1995.

Figura 5  
TENDENCIAS DE INCENDIOS FORESTALES SEGÚN TIPO DE CAUSA. C. VALENCIANA. PERÍODO 1990-2004



Fuente: Elaboración propia a partir Partes de Incendio DGB 1990-2004.

En la C. Valenciana, si se desglosan los incendios por estaciones del año y por tipología detallada de causas, la mayoría de los incendios son de tipo intencionado en todas las estaciones salvo en el verano, estación en la que el porcentaje de intencionados es ligeramente inferior al de los incendios producidos por rayo (26% frente a un 27%). La segunda causa mayoritaria en primavera, otoño e invierno son las quemas agrícolas. Si no se desglosa la tipología de causas en todas las estaciones los incendios obedecen a negligencias (la suma de negligencias supera a los incendios de tipo intencionado).

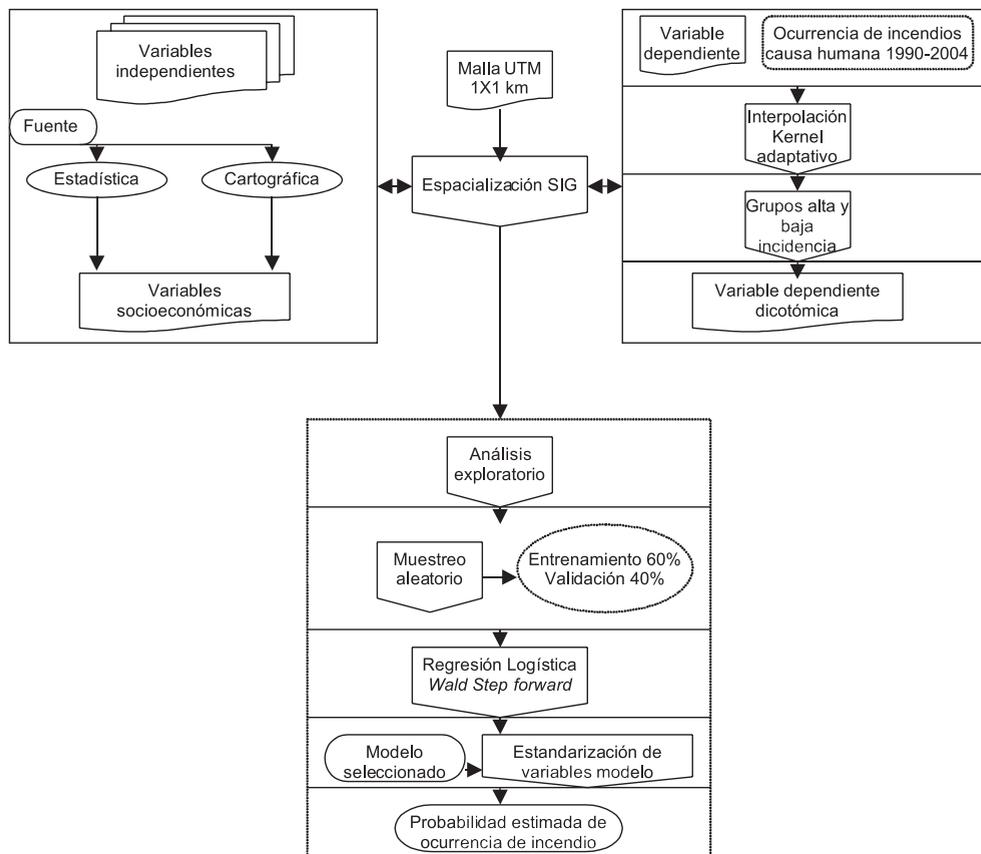
## 2. Metodología

Para la obtención de los modelos de riesgo debidos a causa humana se ha empleado la metodología detallada en los apartados siguientes y recogida en síntesis en la Figura 6.

### A) Generación de variables independientes

En primer lugar, se ha llevado a cabo la generación de las variables independientes que van a formar parte de los modelos predictivos. Estas variables deben ser representativas de los factores de riesgo vinculados a la actividad humana y, a su vez, permitir la cuantificación y representación en el espacio de los mismos. La identificación de estas variables se ha basado en el análisis de fuentes bibliográficas especializadas (Leone *et al* 2003, Martínez 2004, Mar-

Figura 6  
 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA OBTENCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIO DEBIDO A CAUSA HUMANA



tínez *et al* 2004, Pew *et al* 2001, Vega-García *et al* 1995), en las experiencias de proyectos a nivel local y regional de riesgo integrado de incendio forestal (*Firerisk*, 2003; *Spread*, 2003; *Megafires*, 1998) así como en la información obtenida en una encuesta a expertos realizada en el marco del proyecto *Firemap*. En general, se intentó considerar preferentemente aquellas variables de carácter estructural, relacionadas con elementos permanentes del territorio.

Se establecieron cinco grupos de factores de riesgo vinculados a la actividad humana: *accidentes y/o negligencias, transformaciones socioeconómicas, actividades tradicionales en áreas rurales, conflictos y factores de disuasión de la ignición*. Para cada grupo de factores se propuso una relación de variables que permitieran representarlos espacialmente de forma más o menos directa. Estas variables se elaboraron a partir de fuentes de información de tipo cartográfico y estadístico, representándolas espacialmente en la cuadrícula UTM de 1 km<sup>2</sup>, mediante el empleo de herramientas SIG y de manejo de bases de datos y hojas de cálculo. La Tabla 1 recoge las variables independientes generadas dentro de cada factor de riesgo. El

Tabla 1  
VARIABLES INDEPENDIENTES DE TIPO SOCIO-ECONÓMICO

TIPO	FACTOR	NOMBRE DE LA VARIABLE	DESCRIPCIÓN
CARTOGRÁFICA	<b>Accidente o negligencia</b>	b_carret	Buffer de carreteras
		b_carret_for	Buffer de carreteras en zonas forestales
		Indice_imd <sup>3</sup>	Índice de IMD <sup>4</sup> por segmento de carretera (Longitud vía × IMD vía × factor de ponderación)
		Indice_imd_for	
		b_ffcc	Buffer de vías de ferrocarril
		b_ffcc_for	Buffer de vías de ferrocarril en zonas forestales
		b_pistas	Buffer de pistas
		b_pistas_for	Buffer de pistas en zonas forestales
		b_llee	Buffer de líneas eléctricas
		b_llee_for	Buffer de líneas eléctricas en zonas forestales
	Tiro_canteras	Campos de tiro y canteras	
	<b>Transformaciones socioeconómicas</b>	Area_recre	Buffer de áreas recreativas ponderadas por presencia de barbacoa <sup>5</sup>
		Pot_dem	Potencial Demográfico
		ICC	Índice de cambio en superficie forestal ICC = [(Cultivo a Forestal+ Improductivo a Forestal)-(Forestal a Cultivo+Forestal a Improductivo)]
		IUF	Interfaz Urbano Forestal
		vertederos	Buffer de vertederos
		ICF	Interfaz Cultivo Forestal
		IPF	Interfaz Pasto Forestal
		<b>Conflictos que pueden desencadenar incendios intencionados</b>	ENP
	ZEPA		Zonas de Especial Protección de Aves
	M_Preser_UP		Montes de Utilidad Pública y Preservados <sup>6</sup>
	Consor		Montes Consorciados
	<b>Disuasión de la ignición</b>	Torres	Presencia o ausencia de torres o medios de vigilancia

3 Esta variable sólo ha sido calculada en la C. Madrid debido a la disponibilidad de la información de base requerida.

4 IMD: Intensidad Media Diaria de Tráfico.

5 En las C. Madrid y C. Valenciana ha sido llevada a cabo la ponderación por estar disponible el dato de presencia o ausencia de barbacoa.

6 La figura de montes Preservados es propia de la C. Madrid.

TIPO	FACTOR	NOMBRE DE LA VARIABLE	DESCRIPCIÓN
ESTADÍSTICA	<b>Transformaciones socioeconómicas</b>	Var_pob	Variación de la población 1970-2004
		Hotel	Infraestructuras hoteleras
		Var_pob_agra	Variación de la población agraria 1996-2001 (C. Madrid); 1999-2002 (C. Valenciana)
	<b>Actividades tradicionales en áreas rurales</b>	Jefes55	Porcentaje de jefes de explotaciones agrícolas mayores de 55 años
		Carga_gan	Carga ganadera (número de cabezas ovinas y caprinas en superficie de pastos y matorral)
		Maquina	Densidad de maquinaria agrícola
	<b>Conflictos que pueden desencadenar incendios intencionados</b>	Renta	Renta per capita
		Tasa_paro	Tasa de Paro

proceso de representación espacial ha variado en función de la fuente de información de cada variable definida; en el caso de las variables cartográficas éstas se han referido a la superficie de la cuadrícula UTM como un cociente entre el valor del área de la variable en cuestión y el área de la cuadrícula UTM. Para las variables de tipo estadístico, al estar referidas a la unidad espacial de municipio, se intersectaron los polígonos de los municipios con la cuadrícula de 1 km<sup>2</sup>, asignándole a todas las cuadrículas incluidas en cada municipio el mismo valor de la variable estadística en cuestión para ese municipio. En las cuadrículas UTM en las que coincidían varios municipios se asignó una media ponderada por la superficie ocupada por cada municipio en la cuadrícula.

En el caso de variables definidas como *buffer*, se calculó un corredor de anchura variable en función de la distancia de seguridad establecida en las diferentes legislaciones de cada área de estudio, ya sea legislación en materia de incendios forestales ó de otro tipo, como por ejemplo, la relativa a las vías de comunicación. De igual modo, se han calculado las variables de *Interfaz*, estableciendo un corredor o área de influencia de la interfaz en cada cuadrícula, de una distancia definida en la legislación de cada área de estudio.

## B) Generación de la variable dependiente

La ocurrencia de incendios de causa humana en el período de estudio se obtiene a partir de los Partes de Incendio de la Dirección General para la Biodiversidad (DGB). Las estadísticas de incendio en España recogen los incendios ocurridos a nivel municipal y a nivel de cuadrícula de 10×10 km, por lo que no se conoce con exactitud la posición de los puntos de ignición<sup>7</sup>. Al ser la unidad de análisis de este trabajo la cuadrícula de 1 km<sup>2</sup> se ha aplicado

<sup>7</sup> Tan solo recientemente se han comenzado a recoger en los Partes datos relativos a las coordenadas de inicio del incendio. Estos datos son todavía escasos (la serie temporal es corta) y los datos no están disponibles para toda España.

un procedimiento para reducir la incertidumbre en la localización de los puntos de inicio del incendio. Para ello, se combina la información sobre la localización a nivel municipal con la localización por cuadrículas 10x10 km. De esta forma, se acota la localización de los incendios en polígonos de superficie inferior a la de las cuadrículas de referencia. Para afinar aún más esta localización se cruzan los polígonos resultantes con el mapa forestal, eliminando las zonas sin superficie forestal. Este proceso se aplica asumiendo que los incendios se inician en zonas forestales. De esta forma, se consiguen polígonos donde, *a priori*, la localización de los incendios es más precisa (Amatulli *et al*, 2007).

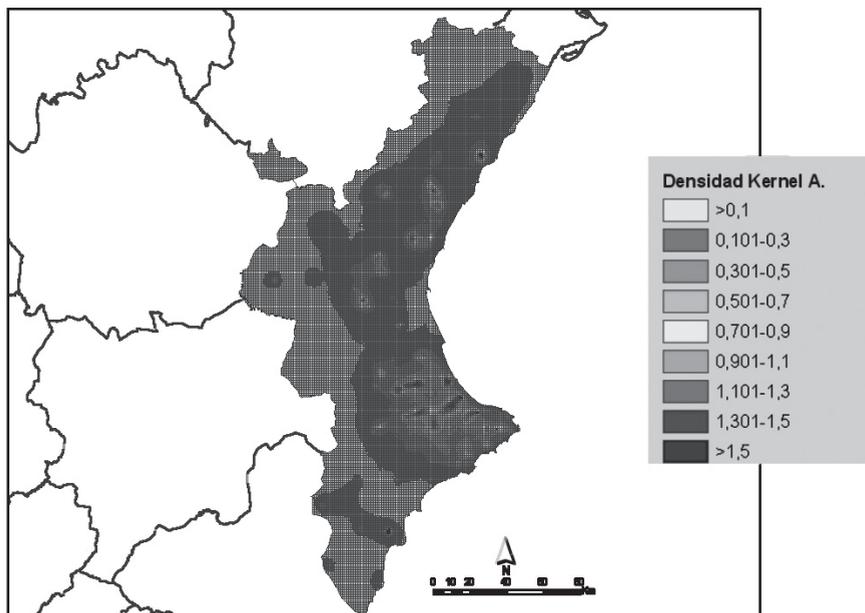
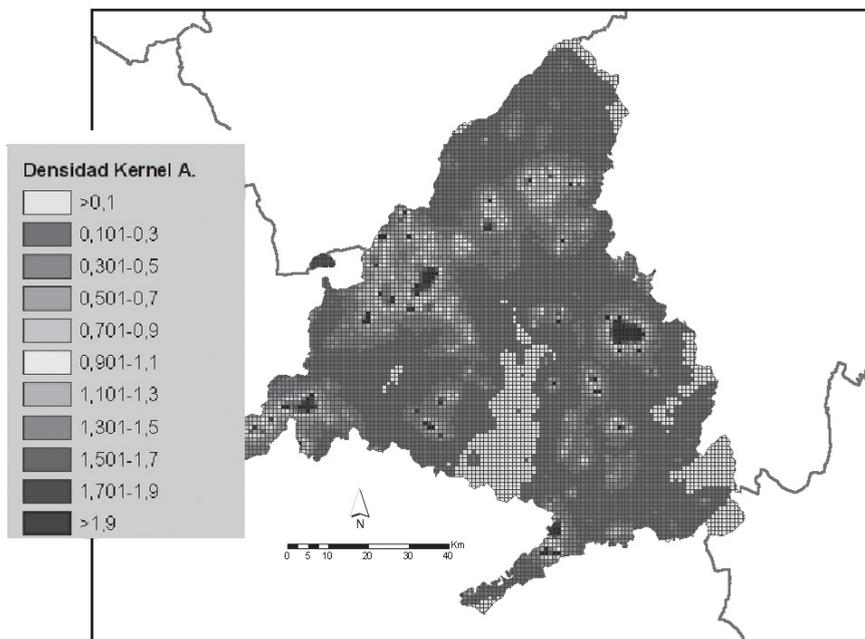
Teniendo en cuenta que se trata de generar un modelo predictivo de los incendios vinculados a actividades humanas, se incluyen en el análisis exclusivamente los incendios de causa humana en cada área de estudio. Dado que, en algunas regiones como la C. Madrid, el porcentaje de incendios de causa desconocida es muy elevado, se decidió asignar parte de los incendios desconocidos a causa humana, teniendo en cuenta, en cada zona de estudio, la proporción de incendios de causa conocida que corresponden a causa humana y a rayos. Al total de incendios desconocidos se le aplica dicha proporción, obteniéndose el número de incendios que se asignarían a rayos en cada área. Éstos se seleccionan de forma aleatoria de entre los incendios desconocidos. El resto de incendios desconocidos se asigna a causa humana. Para llevar a cabo la espacialización de la variable dependiente se han incluido en el análisis los incendios ocurridos en municipios limítrofes a las diferentes áreas de estudio. Este proceso tiene como objetivo reducir los posibles efectos de borde en la espacialización de dicha variable. Se obtienen finalmente 4.537 incendios de causa humana en la C. Madrid y 6.223 en la C. Valenciana para el período de estudio 1990-2004. A partir del número total de incendios referidos a una localización espacial más precisa de acuerdo al proceso anteriormente descrito, se generan puntos aleatorios de ignición mediante el *script* de ArcView 3.2 *Random Point Generator v. 1.3*<sup>8</sup>. Para obtener superficies continuas a partir de estos puntos de ignición se ha utilizado la técnica de interpolación de estimación de densidad de Kernel propuesta por de la Riva *et al*. (2004). Esta técnica consiste en posicionar una probabilidad de densidad sobre cada punto y estimar la densidad en cada intersección de una malla superpuesta al conjunto de puntos (Leone *et al*, 2003 citando a Seaman y Powell, 1996; Levine, 2004):

$$f(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{(x - X_i)}{h} \right\}$$

Siendo  $n$  el número de puntos,  $h$  el parámetro de suavizado ó *bandwidth*,  $x$  el vector de coordenadas que define la localización donde se estima la función y  $X_i$  el vector de coordenadas que define cada observación  $i$ . De entre las funciones diferentes que existen (distribución normal, función cuártica, triangular), se emplea la normal, que es la más utilizada (Levine, 2004). En esta distribución, el *bandwidth* se corresponde con la desviación estándar de la misma. En cuanto al procedimiento para fijar el kernel, este puede ser fijo (*bandwidth* constante) o adaptativo (*bandwidth* varía dependiendo de la concentración de puntos) (Leone *et al* 2003 citando a Wornton, 1989). Este último procedimiento ofrece una mayor flexibilidad

<sup>8</sup> *Random Point Generator v. 1.3*. Autor: Jeff Jenness. Wildlife Biologist, GIS Analyst. Jenness Enterprises. jeffj@jennessent.com

Figura 7  
INTERPOLACIÓN KERNEL ADAPTATIVO. VARIABLE DEPENDIENTE CONTINUA OCURRENCIA DE INCENDIOS DEBIDOS A CAUSA HUMANA



en la estimación de densidad, dado que el *bandwidth* se calcula como una función inversa a la concentración de puntos. En áreas con alta concentración será menor, mientras que con poca presencia de puntos será mayor (Amatulli *et al*, 2007). Debido a que los incendios no se distribuyen de manera regular, se emplea el modo adaptativo. El tamaño de intervalo de *bandwidth* establecido en cada zona de estudio para llevar a cabo la interpolación obedece a la elección del mismo según la minimización del *goodness-of-fit criteria* propuesto por Breiman *et al* (1977). Con este procedimiento se ensayan distintos órdenes de vecino próximo para dar con el que minimiza la curva de ajuste. En la C. Madrid es de 5 puntos, mientras que en la C. Valenciana es de 25 puntos. La interpolación se lleva a cabo con *Crimestat*® 3.0 (Levine, 2004). La Figura 7 muestra el resultado de la interpolación, en cada zona, que será utilizado como variable dependiente en el modelo.

El método de regresión logística requiere una variable dependiente dicotómica. Así pues, fue necesario transformar la variable continua (número de incendios de causa humana) a dicotómica. Esto se hizo dividiendo la variable ordenada en 3 grupos con el mismo número de casos (grupo 1, cuadrículas con baja incidencia, grupo 2 de incidencia intermedia y 3 de alta incidencia). A los casos incluidos en el primer grupo se les da valor 0 y a los del grupo 3 valor 1. Se eliminan del análisis los valores intermedios que quedarían en el grupo 2.

### C) Generación de los modelos

El método de regresión logística empleado ha sido utilizado en análisis anteriores para la estimación de la ocurrencia de incendios forestales a escalas regionales y locales, obteniéndose modelos predictivos y explicativos, al conocer las variables de mayor importancia en el fenómeno (Carvacho, 2002).

El objetivo que se persigue con la aplicación de este modelo es estimar la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente dicotómica (en nuestro caso, alta o baja incidencia de incendio) a partir de las variables independientes, es decir, obtener la probabilidad de que cada individuo pertenezca a cada uno de los grupos que define la variable dependiente (González, 2006). De igual forma, se comprueba la relación entre la variable dependiente y las independientes seleccionadas en el modelo.

El modelo de regresión logística se define:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

$$z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p$$

Donde  $P_i$  es la probabilidad de ocurrencia de incendio,  $z$  la combinación de variables independientes con sus coeficientes de regresión ( $\beta$ ),  $X$  el valor de cada variable independiente y  $e$  la base del logaritmo natural (Pew y Larsen, 2001 citando a Afifi y Clark, 1990; McGrew y Monroe, 1993).

De entre las posibilidades de modelos de regresión logística binaria se aplica el modelo *logit*:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = x^T \beta$$

Siendo  $x^T$  el vector de las variables explicativas y  $\beta$  el vector de los parámetros (González, 2006).

La regresión logística tiene una serie de asunciones (Garson, 2006), como las de no asumir relación lineal entre la variable dependiente y las independientes. Por otra parte, la variable dependiente no necesita seguir una distribución normal así como ser homocedástica (homogeneidad de la varianza). Si se incluyen variables irrelevantes en el modelo, la varianza que comparten puede ser atribuida de forma errónea a estas variables irrelevantes. Esta técnica asume que los términos de error son independientes y no tiene en cuenta los efectos de interacción entre las variables; no ha de darse multicolinealidad. Cuando las variables independientes tienen mucha relación entre si el modelo no puede distinguir qué parte de la variable dependiente es explicada por una u otra variable (Villagarcía, 2006). Según aumenta la correlación entre las variables, el error estándar de los coeficientes se incrementa. La multicolinealidad no cambia la estimación de los coeficientes, pero sí su seguridad.

Para evitar la inclusión de variables que causen problemas de colinealidad se exploró, previamente a la elaboración del modelo, el grado de correlación entre las variables independientes, mediante coeficientes de correlación no paramétricos de *Spearman*. En aquellas variables que presentan correlación superior a 0,9 (C. de Madrid) y 0,7 (C. Valenciana) se explora su correlación con la variable dependiente, excluyendo del modelo la que esté menos correlada de cada par. Posteriormente, con las variables que quedan tras esta primera selección, se estudia el fenómeno de multicolinealidad mediante diagnósticos propios de la técnica de regresión multivariante, como son el Coeficiente de tolerancia, el Factor de Inflación de la Varianza y los Autovalores, Índice de condición y Proporción de la varianza. Finalmente, se aplicaron tests no paramétricos de estadística comparativa que proporcionan una medida de la diferencia entre dos conjuntos de datos (Martínez *et al* 2005). El objetivo es comprobar si existe diferencia significativa entre los valores de las variables seleccionadas correspondientes a dos muestras de cuadrículas, unas con alta ocurrencia y otras con baja ocurrencia de incendios (*Prueba de la U-Mann-Whitney* y *Kruskal-Wallis*).

A partir de los resultados obtenidos en los diagnósticos de colinealidad, correlación y tests de estadística comparativa se excluyen del modelo las variables que den lugar a problemas de colinealidad y que no sean significativas al comparar muestras independientes.

Al aplicar la regresión logística se ha empleado el método por *pasos hacia delante de Wald*, con el valor 0,5 como punto de corte para la clasificación. El modelo se obtuvo empleando una muestra aleatoria del 60% de los casos, utilizando el 40% restante para validar la calidad de las estimaciones. Una vez validado el modelo se aplica a la totalidad de los casos, para posteriormente obtener la probabilidad de ocurrencia de incendio en el total del área de estudio. Quedan sin valorar aquellas celdas en las que el uso urbano ocupe una superficie superior al 50%. Para la obtención de la variación real de la variable dependiente en relación a cada independiente se aplica regresión logística con las variables del modelo normalizadas.

#### IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la C. de Madrid tras llevar a cabo las correlaciones no paramétricas de Spearman señalan que no han de incluirse en el análisis las variables *buffer de carreteras*, *pistas* y *máquina* por su alta correlación con otras variables. A partir de tests no paramétricos de estadística comparativa se observa que las variables *buffer líneas de ferrocarril*, *buffer líneas eléctricas*, *campos de tiro-canteras* y *montes consorciados* no presentan diferencias significativas al 95% de confianza (p-valor mayor de 0,05) para dos muestras independientes del primer y cuarto cuartil (resultados del test de la *U-Mann-Whitney*) y que la variable *buffer líneas eléctricas* no es significativa en la comparación de las 4 muestras independientes, al 95% de confianza (resultados de la prueba de *Kruskal-Wallis*). Por estos motivos las variables señaladas se excluyen del análisis posterior. Los diagnósticos de colinealidad propios de la técnica de regresión múltiple muestran que la variable *renta* presenta problemas de colinealidad, por lo que de igual modo se excluye del análisis. Por tanto, los análisis previos en la C. Madrid para estudiar el efecto de la colinealidad y de la relación entre variables indican que las variables *buffer carreteras*, *buffer carreteras en zona forestal*, *buffer pistas*, *maquinaria agrícola*, *renta*, *buffer líneas de ferrocarril*, *buffer líneas eléctricas*, *campos de tiro y canteras*, *montes consorciados* y *renta* presentan problemas, por lo que no van a ser incluidas en el análisis. En la C. Valenciana los mismos análisis estadísticos señalaron la conveniencia de excluir las variables *buffer pistas*, *máquina*, *vertederos* y *tasa de paro*.

Mediante la técnica de regresión logística binaria, una vez eliminadas las variables que presentaban problemas de colinealidad y, utilizando la variable dependiente obtenida a partir de interpolación mediante kernel adaptativo, se obtuvieron 17 modelos en la C. Madrid entre los que, finalmente, se seleccionó el modelo 7 por ser el que ofrecía una mejor relación entre complejidad (número de variables independientes) y acierto en la clasificación. Los porcentajes globales de acierto de clasificación de la muestra de calibración (60 %) y de validación (40 %) son 71,6 y 70,3 %, respectivamente. En la C. Valenciana se obtuvieron 20 modelos, eligiendo el 9. Los porcentajes globales de acierto de clasificación de la muestra de elaboración del modelo (60 %) y de validación del mismo (40 %) son 69,6 y 70,6 %, respectivamente.

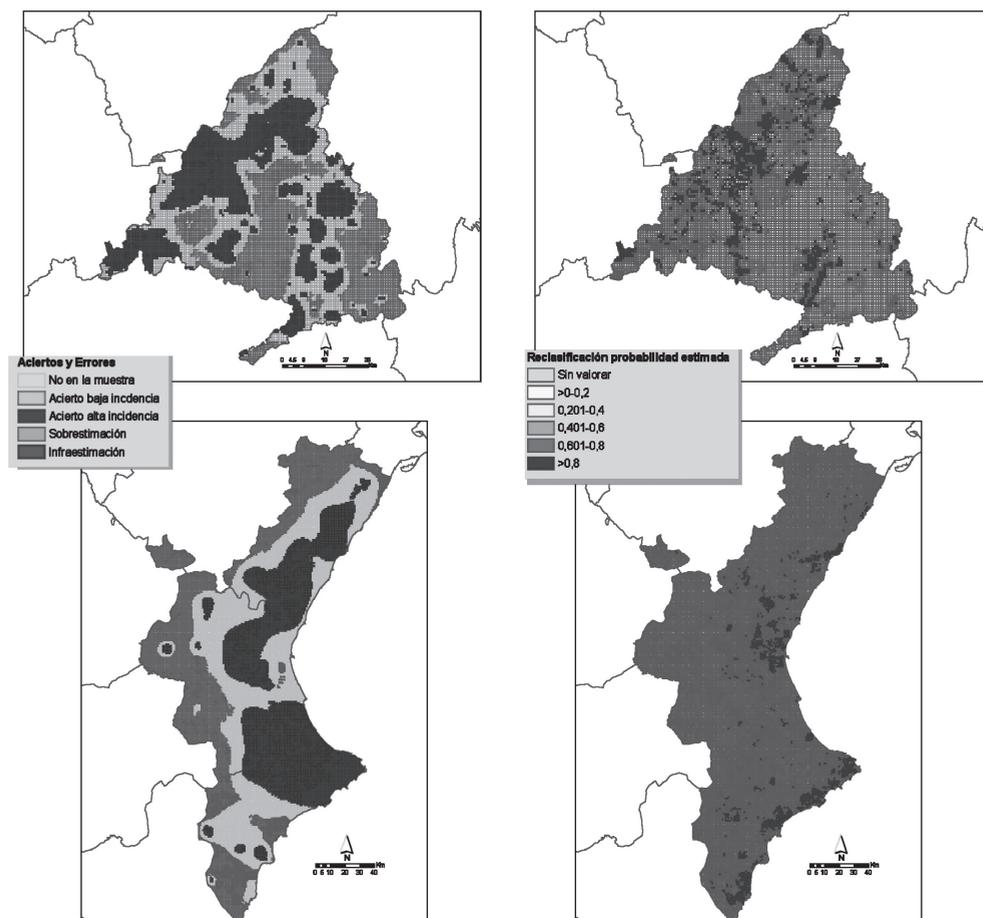
Al aplicar la ecuación del modelo elegido al 100 % de la muestra se obtiene un 70,6 % correcto de clasificación global de la misma, estando la baja incidencia correctamente clasificada en un 75,4 % y la alta incidencia en un 65,7 % en la C. Madrid. Los resultados fueron muy similares en la C. Valenciana donde se obtuvo un 68,4 % correcto de clasificación global, estando la baja incidencia correctamente clasificada en un 79,4 % y la alta incidencia en un 57,4 %.

En Madrid el modelo incluyó un total de 7 variables de las cuales, las que más influyen en la variación de la variable dependiente fueron la *interfaz urbano-forestal* seguida por la variable *ENP*, la tasa de paro y el *buffer de pistas* en zona forestal. Las que menos influyen fueron las infraestructuras hoteleras, la variación de la población agraria y los jefes mayores de 55 años, todas ellas variables de tipo estadístico. En la C. Valenciana es la variable *variación de la población* la que más influye en la variación de la variable dependiente. Le sigue la variable *Potencial demográfico*. En esta región las variables que producen menos variación

en la variable dependiente y, por tanto, las que menor peso tienen en el modelo, son la interfaz pasto-forestal, las infraestructuras hoteleras y los jefes mayores de 55 años.

A continuación se muestran los mapas de los aciertos y errores para la muestra de comprobación y validación de los modelos, así como los mapas de probabilidad estimada en los que no se ha valorado aquellas celdas con una superficie superior al 50% de uso urbano (Figura 8).

Figura 8  
MAPAS DE ACIERTOS Y ERRORES Y DE PROBABILIDAD ESTIMADA DE RIESGO HUMANO C. MADRID (MODELO 7) Y C. VALENCIANA (MODELO 9)



En el mapa de acierto y error de la C. Madrid se observan zonas de infraestimación en el Norte, Noreste y Sureste (zonas de la *Sierra de Madrid*, *Alcalá de Henares* y *Aranjuez*), mientras que los errores de sobrestimación aparecen en la zona centro y Suroeste en mayor medida. El modelo predice acertadamente la alta incidencia de Noroeste a Suroeste y en las zonas centro-Sur y Este del área de estudio. El modelo estima valores más altos de probabilidad de ocurrencia en la zona Oeste del área de estudio (*Sierra de Madrid*), que se corresponde con la zona de mayor superficie forestal. Otra zona con alta probabilidad estimada de incendio forestal es la zona del Sureste, que coincide con un área protegida, el *Parque Regional del Sureste*. Las zonas de probabilidad de incendio más bajas se localizan en el centro y Este, en líneas generales.

En la C. Valenciana el mapa de aciertos y errores indica que las zonas de infraestimación del modelo se representan de Norte a Sur así como en varias manchas al Oeste. El modelo acierta en la predicción de la alta incidencia de incendios en la franja citada anteriormente, especialmente en las cuadrículas de la zona Sureste coincidente con la provincia de Alicante. Las zonas de alta probabilidad de incendio se localizan a lo largo de la franja costera coincidiendo con las zonas más pobladas, mientras que la probabilidad va disminuyendo hacia el interior del área de estudio.

## V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los modelos obtenidos en las dos áreas de estudio han ofrecido resultados muy similares en cuanto al porcentaje de acierto, si bien en la C. Madrid se alcanza un porcentaje de acierto global ligeramente superior (70,6%). En ambas zonas los modelos logran una mejor predicción de la baja incidencia de incendio, alcanzando mayor valor de acierto en la C. Madrid (76,4%) que en la C. Valenciana (57,4 %).

Las variables seleccionadas por el modelo generado para la C. Madrid, y en especial la importancia de la *interfaz urbano-forestal*, coinciden con la opinión de los expertos de esta región consultados en el marco del proyecto *Firemap*. Según éstos, los incendios forestales en la C. de Madrid están fundamentalmente relacionados con las negligencias y/o imprudencias en la interfaz urbano-forestal, carreteras y por usos recreativos. En menor medida por usos agrícolas y ganaderos y también por accidentes (chispas en líneas de ferrocarril, uso de maquinaria en zonas forestales, etc.). A la vista de los resultados el modelo explica de manera acertada la influencia de la interfaz urbano-forestal. La variable de ENP fue introducida en el modelo con el propósito de representar el riesgo asociado a los posibles conflictos que la limitación de usos en estos espacios pudiera desencadenar y potencialmente derivar en incendios intencionados. Sin embargo el peso de la variable en el modelo parece indicar que estaría más bien recogiendo el riesgo asociado a la frecuentación para uso recreativo citado por los expertos. En definitiva, la predicción del riesgo que realiza el modelo generado parece considerar adecuadamente las características territoriales relacionadas con el mismo en el área de estudio, una de las más densamente pobladas y con un desarrollo urbanístico constante.

En la C. Valenciana son las variables *variación de la población* y *Potencial demográfico* las que más influyen en la variación de la variable dependiente. El modelo además señala como variables influyentes el *índice de cambio en superficie forestal* y la *interfaz cultivo-*

*forestal*. También en este caso las variables seleccionadas por el modelo coinciden con la opinión de los expertos consultados que señalan la intencionalidad y la negligencia/imprudencia por usos agrícolas y ganaderos como las principales causas humanas de incendio en la región. La C. Valenciana, al igual que el resto de zonas costeras, sobre todo del levante y sur de la Península Ibérica, ha experimentado un gran desarrollo urbanístico ligado a la actividad turística en su franja costera. La afluencia de población en épocas estivales coincide con la estación de mayor riesgo de incendio desde el punto de vista de las condiciones meteorológicas. Los valores más altos de probabilidad obtenidos en el modelo coinciden con las zonas más pobladas y de mayor densidad de población. Sin embargo, el modelo no recoge la variable interfaz-urbano forestal como explicativa del riesgo, aunque sí la interfaz-cultivo forestal como se ha citado anteriormente. Esta variable señala también, en esta zona, la importancia de las actividades agrícolas relacionadas con el riesgo de ignición de incendios. La variable índice de cambio de superficie forestal indica la importancia de la acumulación del material combustible, debido al cambio en el aprovechamiento de las zonas forestales que se ha producido tras el abandono y despoblación de las zonas rurales. El modelo obtenido en este área no consigue resultados de clasificación tan satisfactorios como en el caso de Madrid. Esto puede deberse a la mayor extensión espacial de la región y su diversidad territorial en lo que respecta a las características socio-económicas. Esto hace que el fenómeno de los incendios no sea homogéneo ni en cuanto a la ocurrencia (frecuencia, tamaño de los incendios, etc.) ni, especialmente, respecto a la causalidad. Como consecuencia de ello, es posible que un modelo regional, como el que proponemos en este trabajo no recoja adecuadamente las particularidades de la región y esto provoque un ajuste menor al esperado. Podrían llevarse a cabo modelos de tipo subregional sobre zonas homogéneas para mejorar la capacidad de predicción de los modelos.

Los modelos obtenidos en las dos áreas de estudio coinciden en señalar las variables más directamente relacionadas con la población (potencial demográfico, variación de población) como las de mayor importancia a la hora de explicar el riesgo de incendio por causa humana. De igual forma, aparecen destacadas las variables de interfaz urbano y cultivo forestal, las cuales son objeto de análisis en numerosos estudios de riesgo, y para las que hay legislación específica en materia de prevención de incendios en las comunidades autónomas.

La técnica de R. Logística permite la inclusión de variables de distinta naturaleza por lo que diversos autores la han empleado para el análisis de riesgo de incendio debido a causa humana. La obtención de la variable dependiente con el método detallado anteriormente implica la incertidumbre en la localización de los puntos de ignición así como el empleo de superficies continuas de densidad de incendio. Este hecho puede estar influyendo en el modelo final obtenido, independientemente del método empleado. Sería interesante contar con la localización precisa del inicio de los incendios, resolviendo los problemas de incertidumbre espacial que pueden ser decisivos en los resultados del modelo a la resolución empleada para este estudio. De igual forma, las variables obtenidas a partir de fuentes estadísticas en el proceso de espacialización a la unidad requerida de 1 km<sup>2</sup> pueden estar suministrando cierto ruido, al replicar la información de partida a nivel municipal. En este caso, la solución sería contar con información más detallada lo que no siempre es fácil, especialmente cuando se abordan análisis a escala regional. La regresión logística tiene restricciones propias de la estadística tradicional, y la necesidad de convertir la variable dependiente

en dicotómica hace que no pueda obtenerse una estimación del número de incendios sino únicamente de la probabilidad de ocurrencia o no ocurrencia. A pesar de ello, resulta muy conveniente la posibilidad de obtener resultados expresados en forma de probabilidad pues ello facilita la interpretación de los mismos y la posible integración con otros factores en un sistema de riesgo como el propuesto en el proyecto Firemap (figura 2).

A pesar de las limitaciones se ha demostrado que la metodología propuesta es aplicable a ámbitos geográficos muy diversos siempre que el conjunto de variables independientes representen adecuadamente los factores relacionados con la ocurrencia de incendios en la zona de interés. La consecución de modelos a una resolución espacial como la que se propone en este trabajo puede ser de gran interés para los gestores, permitiendo identificar zonas de alta ocurrencia de incendios y tipos de variables de riesgo humano influyentes en el mismo. Este análisis refleja la importancia de la distribución de usos en los diferentes territorios, y de cómo la acción del hombre está influyendo en el fenómeno de los incendios forestales. Indica la importancia de estos factores socioeconómicos y del interés en incluirlos en los sistemas generales de riesgo de incendio forestal.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la investigación desarrollada por el grupo de Tecnologías de la Información Geográfica del Instituto de Economía y Geografía (IEG) del CSIC en el marco del Proyecto *Firemap*, "Análisis Integrado de Incendios Forestales mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica" (CGL2004-06049-C04-02/CLI) y ha sido parcialmente financiada por el programa de Formación de Personal Investigador FPI BES-2005-7712 del Ministerio de Educación y Ciencia. Deseamos expresar nuestro agradecimiento a todas las instituciones que nos han facilitado información para la realización del estudio: *Dirección General para la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente*; en la Comunidad de Madrid, a la *Dirección General de Medio Natural*; *Dirección General de Carreteras*; *Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural*; *Servicio Cartográfico regional*; *Jefatura Cuerpo de Bomberos*; *Departamento Geografía UAH*. En la C. Valenciana, al *CEAM*, *VAERSA*, *Consellería de Territori i Habitatge*. También expresar nuestro agradecimiento a Patrick Vaughan por sus valiosas correcciones al resumen presentado en inglés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMATULLI, G., PÉREZ-CABELLO, F., DE LA RIVA, J. (2007): Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. *Ecological modelling*, nº 200, 321-333.
- ÁREA DE DEFENSA CONTRA INCENDIOS FORESTALES. Centro de coordinación de la información nacional sobre incendios forestales. (2007): Los Incendios Forestales en España. Decenio 1996-2005. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General para la Biodiversidad, v 1.2, 67.
- BREIMAN, L., MEISEL, W., PURCELL, E. (1977): Variable kernel estimates of multivariate densities. *Technometrics*, nº 19, 135-144.

- CARDILLE, J. A., VENTURA, S.J., TURNER, M.G. (2001): Environmental and Social Factors influencing Wildfires in the Upper Midwest, United States. *Ecological Applications*, nº11(1), 111-127.
- CARVACHO BART, L. (2002): Aplicación de redes neuronales al análisis de datos en teledetección: predicción y cartografía de incendios forestales. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.
- CASTRO, R., CHUVIECO, E. (1998): Modeling Forest Fire Danger from Geographic Information Systems. *Geocarto International*. Vol 13, nº 1, 15-23.
- CHUVIECO, E., SALAS, J., DE LA RIVA, J., PÉREZ, F., LANA-RENAULT, N. (2004): Métodos para la integración de variables de riesgo: el papel de los sistemas de información geográfica, en Chuvieco, E., Martín, P. (Ed.): *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid, CSIC, Instituto de Economía y Geografía, 144-158.
- CHUVIECO, E., SALAS, F.J., CARVACHO, L., RODRÍGUEZ-SILVA, F. (1999): Integrated Fire Risk Mapping. *Remote Sensing of Large Wildfire in the European Mediterranean Basin*. Berlin. Springer-Verlag. 61-84.
- CHUVIECO, E., MARTÍN, P., MARTÍNEZ, J., SALAS, J. (1998): Geografía e Incendios Forestales. *Serie Geográfica*, nº 7, 11-17.
- CHUVIECO, E., SALAS, J. (1996): Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal Geographical Information Systems*, Vol. 10, nº 3, 333-345.
- CHUVIECO, E., SALAS, J. (1994): Sistemas de Información Geográfica y teledetección en la prevención de incendios forestales: un ensayo en el macizo oriental de la Sierra de Gredos. *Estudios Geográficos*, Tomo LV, 217.
- DIRECCIÓN GENERAL PARA LA BIODIVERSIDAD (2006): Estadísticas de Incendios Forestales. Ministerio de Medio Ambiente. <http://www.incendiosforestales.org/estadisticas.htm>.
- ESTIRADO, F., MOLINA, V. (2005): El problema de los incendios forestales en España. Documento de Trabajo, *Fundación Alternativas*.
- FERRANDO, J.F. (2004): Restauración de funciones ambientales de una zona forestal quemada en La Hoya de Buñol. Trabajo Profesional Fin de Carrera. ETSIAM, Universidad de Córdoba.
- FIDALGO GARCÍA, P., MARTÍN ESPINOSA, A. (2005): *Atlas Estadístico de la Comunidad de Madrid 2005*. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Madrid.
- GARSON, D. (2006): Statnotes: Topics in Multivariate Analysis. <http://www2.chass.ncsu.edu/garson/pa765/statnote.htm>
- GONZÁLEZ, C. (2006): “Análisis de Datos Cualitativos”, en: Curso de Metodología de Investigación Cuantitativa. Técnicas Estadísticas. CSIC.
- GOUMA, V., CHRONOPOULOU-SERELI, A. (1998): Wildland Fire Danger Zoning-A Methodology. *International Journal of Wildland Fire*, 8(1), 37-43.
- INFOCA (2006): Clima e información meteorológica. Capítulo III. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.

- INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE LA C. MADRID (2006): Datos municipales, en: <http://www.madrid.org/iestadis/>
- INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE LA C. VALENCIANA (2006): Revisión del Padrón 2006, en: <http://ive.infocentre.gva.es/>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE) (2007): Estimaciones de población a partir censo 2001, en: <http://www.ine.es/inebase2>
- IZQUIERDO, J., (2006): *Jornada sobre Incendios Forestales*. Fundación Biodiversidad. Fundación Santander-Central Hispano.
- LEONE, V., KOUTSIAS, N., MARTÍNEZ, J., VEGA-GARCÍA, C., ALLGÖWER, B., LOVREGGIO, R. (2003): The human factor in fire danger assessment, en Chuvieco, E. (Ed): *Wildland fire Danger estimation and mapping. The role of remote sensing data. Series in Remote Sensing*. World scientific Publishing Co. pp. 143-194.
- LEVINE, N. (2004): Kernel density interpolation, en: Crimestat 3.0, Capítulo 8.
- LORENZO, M<sup>a</sup> C., PEREZ, M<sup>a</sup> C., (1995): “Modelos de probabilidad para el estudio de la ocurrencia de incendios forestales”, en: *IX reunión ASEPELT España*. Santiago de Compostela.
- MARTELL, D.L., OTUKOL, S., STOCKS, B.J (1985): “A daily people-caused forest fire occurrence prediction model”, en: *8<sup>th</sup> National Conference on Fire and Forest Meteorology*. Detroit, Michigan.
- MARTELL, D.L., OTUKOL, S., STOCKS, B.J (1987): A logistic model for predicting daily people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Caumar*.
- MARTÍN, P. BONORA, L., CONESE, C., LAMPIN, C., MARTÍNEZ, J., SALAS, J. (2002): Towards methods for investigating on wildland fire causes. *Deliverable D-05-02*. EUFI-RELAB, en: <http://eufirelab.org>
- MARTÍNEZ, J., MARTÍN, M.P., ROMERO, R., MARTÍNEZ, J., ECHAVARRÍA, P. (2005): Aplicación de los SIG a los modelos de riesgo de incendios forestales: riesgo humano a escala regional. De lo local a lo global: nuevas tecnologías de la información geográfica para el desarrollo, en J. L. Gurría Gascón, Hernández Carretero, A., Nieto Masot, A. (Eds.). Servicio de Publicaciones Universidad de Extremadura: 329-345.
- MARTÍNEZ, J. (2004): Análisis, Estimación y Cartografía del Riesgo Humano de Incendios Forestales. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.
- MARTÍNEZ, J., MARTÍNEZ, J., MARTÍN, P. (2004): El factor humano en los incendios forestales: Análisis de factores socio-económicos relacionados con la incidencia de incendios forestales en España, en Chuvieco, E., Martín, P. (Eds.): *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid, CSIC, Instituto de Economía y Geografía, 101-142.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (2004): Hechos y cifras de la Agricultura, la Pesca y la Alimentación en España, en: <http://www.mapa.es/es/ministerio/pags/hechoscifras/introhechos.htm>
- MOYANO, E. (2006): “Procesos de cambio en la agricultura y el mundo rural. Algunas reflexiones para el debate”. *Jornada sobre Incendios Forestales*. Fundación Biodiversidad. Fundación Santander-Central Hispano.

- PERESTRELLO DE VASCONCELOS, M.J, SILVA, S., TOMÉ, M., ALVIM, M., CARDOSO PEREIRA, J.M (2001): Spatial Prediction of Fire Ignition probabilities: Comparing Logistic Regression and Neural Networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 73-81.
- PEW, K.L., LARSEN, C.P.S (2001): GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. *Forest Ecology and Management*, 140, 1-18.
- PLAN GENERAL DE ORDENACIÓN FORESTAL DE LA COMUNIDAD VALENCIANA (2004): Decreto 106/2004, de 25 de junio, del Consell de la Generalitat Valenciana.
- DE LA RIVA, J., PÉREZ-CABELLO, F., LANA-RENAULT, N., KOUTSIAS, N. (2004): Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment*, 92, 363-369.
- SALAS, J., COCERO, D. (2004): El concepto de peligro de incendio. Sistemas actuales de estimación del peligro. Capítulo II. en Chuvieco, E., Martín, P. (Eds.): *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid, CSIC, Instituto de Economía y Geografía, 23-32.
- SUÁREZ TORRES, J. (2000): “La prevención de incendios forestales en la Comunidad Valenciana”, en: publicaciones de la Real Sociedad Económica de Amigos del País. Valencia.
- VEGA GARCÍA, C., WOODARD, P.M, TITUS, S.J., ADAMOWICZ, W.L., LEE, B.S (1995): A Logit Model for predicting the Daily Occurrence of Human Caused Forest Fires. *International Journal Wildland Fire*, 5 (2), 101-111.
- VÉLEZ, R. (2005): Defensa contra incendios forestales: estrategias, recursos, organización, en: <http://forum.europa.eu.int>
- VILLAGARCÍA, T. (2006): “Regresión”, en: Curso de Metodología de Investigación Cuantitativa. Técnicas Estadísticas. CSIC.
- WWW/ADENA. (2007): Incendímetro. Incendios forestales. Verano 2007, en: <http://www.wwf.es/incendios07.php>

